



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica

Diseño y análisis estático de una Handbike

Autor: Juan Carlos Sánchez Sánchez

Tutor: Marcos Rodríguez Millán

Leganés, Octubre de 2015

A mi familia y amigos, por todos los momentos que me han traído hasta aquí.

A ti Virgi, por ser mí soporte cada día.

Resumen

El diseño industrial, en la actualidad, no se concibe sin el uso de nuevos materiales (materiales compuestos, súperaleaciones, nanoestructuras), ni de herramientas tecnológicas, como los diferentes software especializados en el diseño asistido por computador (conocido como CAD, Computer Aided Design), o los software especializados en el análisis estructural mediante el método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method), piezas básicas en cualquier actividad relacionada con el I+D+i.

El uso de software CAD permite la realización de modelos 3D con un alto grado de detalle, así como el desarrollo de superficies complejas, y son un gran soporte para los análisis de viabilidad de los diseños desde el punto de vista productivo y de mantenibilidad. Por su parte el software FEM ha facilitado el análisis estructural y, este método, permite simplificar problemas complejos desde el punto de vista físico y matemático, que hasta su aparición eran de difícil resolución.

Este proyecto es un ejemplo de desarrollo de una estructura realizada en material compuesto, en el que se realiza un modelo 3D mediante software CAD, y posteriormente un análisis estructural, con el uso de software FEM. La estructura a analizar es el prototipo de un chasis de una Handbike, bicicleta usada en el ciclismo adaptado para personas con algún tipo de minusvalía e impulsada por las manos. Como características principales de esta estructura, caben destacar el material utilizado, íntegramente en fibra de carbono, y su finalidad, el ascenso del monte Kilimanjaro por una persona con problemas de movilidad.

Debido a que la estructura analizada es un prototipo ya fabricado que no ha sido modelizado con anterioridad, los objetivos principales de este proyecto son aportar un modelo 3D basado en la geometría fabricada, los planos que definen la estructura, y un análisis estructural, con el fin de aportar datos relevantes sobre el diseño realizado, como pueden ser zonas de concentración de cargas, necesidades de diseño por problemas en el proceso de fabricación, posibles mejoras, etc.

Palabras clave: CAD, FEM, Handbike, Kilimanjaro, CFRP

Abstract

Actually, industrial design, is inconceivable without the use of new materials (composites, superalloys, nanostructures) or technological tools, such as different specialized in computer-aided design (known as CAD, computer aided design software), or specialized software in structural analysis using the finite element method (FEM, finite element Methods), basic pieces in any activity related to R+D+i.

The use of CAD software allows the realization of 3D models with a high degree of detail, and the development of complex surfaces, and it is a great support for the feasibility study of the designs from the point of view of production and maintainability. Meanwhile the FEM software has provided the structural analysis, and this method allows to simplify complex problems from the point of view physicist and mathematician, who until his appearance were difficult to resolve.

This project is an example of developing of an structure made of composite material, in which a 3D model is performed using CAD software, and then a structural analysis using FEM software. The structure analyzed is a prototype chassis from a handbike, bicycle used in cycling adapted for people with some kind of disability and driven through the hands. The main characteristics of this structure, we would highlight the material used, entirely in carbon fiber, and its purpose, the ascent of Mount Kilimanjaro for a person with mobility problems.

Due to the fact that the analyzed structure is a prototype already manufactured that has not been modeled before, the main objectives of this project are to provide a 3D model based on the fabricated geometry, planes that define the structure and structural analysis in to provide data relevant about the design made, as can be load concentration zones, design needs by problems in the manufacturing process, improvements, etc.

Key words: CAD, FEM, Handbike, Kilimanjaro, CFRP

Índice

Resumen.....	I
Abstract	II
Índice	III
Índice de ilustraciones.....	V
Índice de tablas	VI
1 Objetivos	1
2 Conceptos previos.....	2
2.1 Bicicleta de mano (Handbike)	2
2.2 Monte Kilimanjaro.....	5
2.3 Material compuesto	7
2.3.1 Fibra de carbono (CFRP)	7
2.3.2 Estado del arte de CFRP	9
2.4 Método de elementos finitos.....	10
2.4.1 Concepto de FEM	10
2.4.2 Proceso de Análisis por Elementos Finitos.....	12
3 Modelado	13
3.1 Handbike Prototipo	13
3.2 Modelado Chasis de Handbike	15
3.3 Descripción del conjunto.....	19
3.4 Descripción por elemento	24
3.4.1 Cuerpos del chasis	25
3.4.2 Refuerzos internos	26
3.4.3 Refuerzo externos	29
4 Análisis estructural	32
4.1 Definición modelo FEM	32
4.1.1 Modelado Geométrico,	32
4.1.2 Modelado de Elementos Finitos.....	34
4.1.3 Definición de condiciones de contorno.....	35
4.2 Resultados	37

4.2.1	Análisis estático carga en sillín y pedalier	38
4.2.2	Análisis estático, carga en apoya-pecho y pedalier	40
5	Conclusiones.....	42
5.1	Diseño.....	42
5.2	Análisis estructural	43
6	Trabajo futuros.....	44
7	Referencias.....	45

Índice de ilustraciones

Figura 1.	Ejemplo Handbike	2
Figura 2.	Handbike de paseo.....	3
Figura 3.	Handbike de velocidad en carretera	3
Figura 4.	Handbike con dos ruedas delanteras [6].....	4
Figura 5.	Monte Kilimanjaro.....	5
Figura 6.	Perfil ejemplo, ruta Machame (Kilimanjaro).....	6
Figura 7.	Comparación de características mecánicas de materiales compuestos y metales	8
Figura 8.	Demanda mundial de fibra de carbono en toneladas 2008-2020	9
Figura 9.	Handbike prototipo (<i>SILLA KILIMANJARO</i>).....	13
Figura 10.	Handbike prototipo	14
Figura 11.	Chasis, estructura a estudio	14
Figura 12.	Chasis de Handbike	15
Figura 13.	Chasis de Handbike modelo 3D.....	16
Figura 14.	Cuerpo de chasis fabricado	17
Figura 15.	Cuerpo de chasis modelo 3D.....	17
Figura 16.	Refuerzos interiores fabricados.	18
Figura 17.	Refuerzos interiores modelo 3D	18
Figura 18.	Chasis, vista isométrica	19
Figura 19.	Conjunto de chasis explosionado.....	20
Figura 20.	Cuerpos del chasis RH y LH.....	21
Figura 21.	Refuerzos internos	22
Figura 22.	Refuerzos internos (“CUERPO CHASIS RH” no mostrado).....	22
Figura 23.	Refuerzos externos.....	23
Figura 24.	Cuerpos del chasis RH y LH.....	25
Figura 25.	Cuerpo del chasis RH	25
Figura 26.	Refuerzos internos, vista isométrica	26
Figura 27.	Refuerzos internos, vista lateral.....	26

Figura 28.	Esquema estándar de apilado en refuerzos internos	26
Figura 29.	Detalle refuerzos internos 1.....	27
Figura 30.	Detalle refuerzos internos 2.....	28
Figura 31.	Refuerzos externos, vista isométrica	29
Figura 32.	Refuerzos externos, vista lateral	29
Figura 33.	Esquema de apilado en refuerzos internos perfil en “L”	30
Figura 34.	Esquema de apilado en refuerzos internos perfil en “T”	30
Figura 35.	Comparación modelo 3D del chasis y superficies para calculo FEM.....	32
Figura 36.	Superficies modelo FEM.....	33
Figura 37.	División de superficies en modelo geométrico	34
Figura 38.	Vista general del mallado	34
Figura 39.	Puntos de empotramiento	35
Figura 40.	Zonas de aplicación de cargas.....	36
Figura 41.	Envolvente de falla para un composite en el plano ($\sigma_1 \sigma_2$)	37
Figura 42.	Desplazamientos, hipótesis de carga en el sillín y pedaliar.....	38
Figura 43.	Micro Strains, hipótesis de carga en el sillín y pedaliar	38
Figura 44.	Detalle zona concentración de microstrain	39
Figura 45.	Desplazamientos, hipótesis de carga en el apoya-pecho y pedaliar.....	40
Figura 46.	Micro Strains, hipótesis de carga en el apoya-pecho y pedaliar.....	40
Figura 47.	Detalle zona concentración de microstrain	41

Índice de tablas

Tabla 1.	Rutas habituales para alcanzar la cumbre del Kilimanjaro	6
Tabla 2.	Lista de materiales	20
Tabla 3.	Propiedades de la fibra de carbono curada	24
Tabla 4.	Detalle refuerzos exteriores.....	31
Tabla 5.	Comparación modelos CAD Modelos FEM.....	33

1 Objetivos

La empresa Airbus y la Institution of Mechanical Engineers (IMechE) del Reino Unido han desarrollado una silla de ruedas todoterreno de fibra de carbono que permitirá a una persona con discapacidad superar las barreras que harían del ascenso al Kilimanjaro un sueño imposible. [1]

Debido a que la fabricación está en fase de prototipo, la silla se ha visto evolucionada desde las ideas originales, principalmente en número de elementos y refuerzos. Esto hace que no se disponga de un modelo 3D y planos que recojan la información del estado actual del diseño.

Este estudio nace como un complemento a las tareas desarrolladas en dicha fabricación y se centra en la realización de un modelado 3D de la estructura fabricada, así como los planos de definición de cada elemento que forma el chasis de la silla. Una vez realizado el modelo, se realizará un análisis estructural con las condiciones estándar de uso de este tipo de sillas. Este análisis se realiza desde el punto de vista del diseñador, con el fin de aportar información sobre posibles puntos críticos.

El desarrollo del proyecto se basa en:

- Toma de datos. Obtención in situ de las dimensiones de la estructura fabricada, así como toda la información necesaria para la definición de cada elemento, disposición del apilado y situación en el conjunto.
- Modelado 3D. Con el uso de software CAD, realización de modelos según las mediciones obtenidas.
- Modelado 2D. Realización de planos de definición en base a los modelos 3D.
- Análisis mediante el método de elementos finitos de la estructura. El estudio se realizará según las condiciones previsibles para el ascenso de una montaña con las características del Kilimanjaro un gran desnivel y velocidad de avance lenta.
- Conclusiones. Aportar información de puntos críticos así como posibles mejoras de diseño para nuevos desarrollos.

2 Conceptos previos

El desarrollo principal del trabajo se centra en el modelado y análisis de la estructura de una bicicleta de mano; para su realización, ha sido necesario estudiar previamente las temáticas que lo rodean y por ello se ha recopilado información sobre los conceptos que se vinculan al estudio.

- Bicicleta de mano (Handbike).
- Monte Kilimanjaro.
- Material compuesto.
- Método de elementos finitos.

A modo de introducción, se indican unas breves reseñas y las principales características de cada uno de ellos.

2.1 Bicicleta de mano (Handbike)

Las bicicletas de mano, también conocidas como Handbike, son un tipo de vehículo terrestre impulsado por los brazos en lugar de por las piernas, como en una bicicleta estándar. Esta variación, proporciona a personas con algún tipo de discapacidad, la posibilidad de la realización del deporte del ciclismo con total libertad.



Figura 1. Ejemplo Handbike

Las Handbikes estándar son triciclos, lo que las hace ser muy estables frente al vuelco, y su configuración no es única, ya que según el fabricante y su finalidad se encuentran en el mercado una gran diversidad de diseños.

Las diferencias que encontramos en cada diseño son muy variadas. En función del material utilizado, se pueden encontrar bicicletas con la estructura principal fabricada en aluminio o en fibra de carbono. Según la finalidad de su uso, encontramos handbike de paseo (figura 2), montaña o velocidad en carretera (figura 3). Y atendiendo a la configuración de las ruedas, se encuentran configuraciones con dos ruedas traseras o dos ruedas delanteras (figura 4).



Figura 2. Handbike de paseo



Figura 3. Handbike de velocidad en carretera



Figura 4. Handbike con dos ruedas delanteras [6]

2.2 Monte Kilimanjaro

El Kilimanjaro es el pico más alto del continente africano y también la montaña independiente más alta del mundo. El aumento de altura es impresionante, pasando de una zona de matorral costero que rodea la elevación de unos 900 metros de altura hasta los 5.895 metros de altura que tiene el pico [2].

Acerca de Parque Nacional del Kilimanjaro [2],

- Formado por tres volcanes inactivos el Shira, de 3962 m de altitud, el Mawenzi, de 5149 m, y el Kibo cuyo pico asciende hasta los 5895 m
- Tamaño. 1.668 kilómetros cuadrados.
- Ubicación. El norte de Tanzania, cerca de la ciudad de Moshi.



Figura 5. Monte Kilimanjaro

El Kilimanjaro es una de las cumbres accesible más altas del mundo, un reto que intentan superar miles de personas cada año. La ascensión puede aproximarse más a una actividad de marcha o trekking prolongado que a una ascensión alpina, encontrando por lo general camino bien marcado con un buen mantenimiento. De acuerdo con esto, las dificultades reales serán sobre todo dos, la distancia recorrida y en especial el mal de altura, ya que cada día, se avanza ganando altura.

En la Tabla 1 [3], podemos ver las distancias de las rutas más usuales. En la figura 6 se representa un perfil ejemplo de una de estas rutas.

Ruta	Distancia (km)*	Días*	Aclimatación	Vistosidad	Tráfico
Marangu	70	5	Buena	Media	Muy alto
Machame	55	6	Buena	Alta	Medio
Umbwe	47	5	Regular	Alta	Muy bajo
Lemosho	65	7	Muy Buena	Alta	Bajo
Rongai	50	5	Buena	Alta	Muy bajo

* Mínimo posible, aumentar para mejorar la aclimatación

<http://elkilimanjaro.com>

Tabla 1. Rutas habituales para alcanzar la cumbre del Kilimanjaro

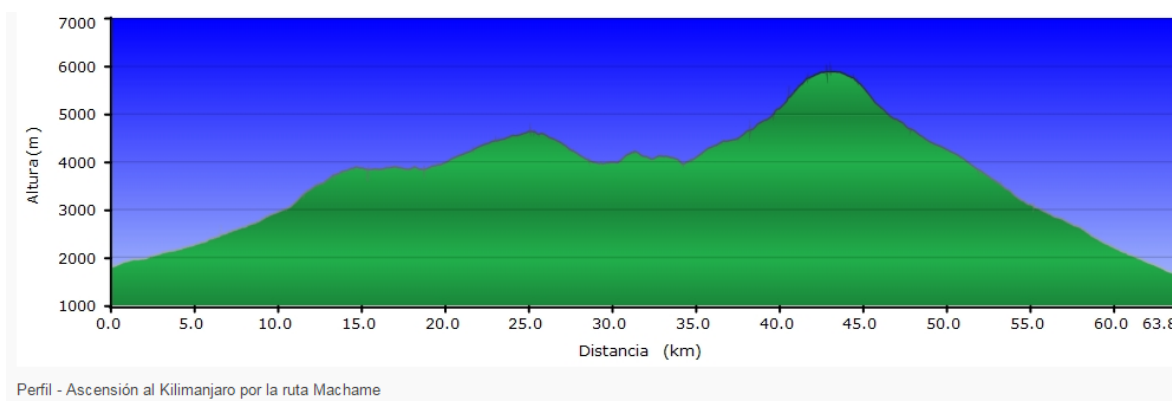


Figura 6. Perfil ejemplo, ruta Machame (Kilimanjaro)

2.3 Material compuesto

Según su definición, material resultado de la mezcla de dos constituyentes insolubles entre sí, y cuyas propiedades son distintas a las de sus constituyentes. Estos materiales nacen de la necesidad de aunar las propiedades de los metales, cerámicos y plásticos.

Algunos ejemplos de los materiales compuestos podrían ser plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP), plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP), termoplásticos y un largo etcétera de materiales que se usan en la actualidad en todo el sector industrial.

Este proyecto se centra en los materiales compuestos de fibra de carbono (material utilizado en la estructura prototipo fabricada), que debido a su excelente relación peso-resistencia se han convertido en un adecuado reemplazo de los materiales metálicos, tradicionalmente utilizados en las aplicaciones que requieren bajo peso. Además, sus excelentes propiedades mecánicas los constituyen como materiales apropiados para usarlos en aplicaciones estructurales.

2.3.1 Fibra de carbono (CFRP)

En la actualidad, un material que sin duda es sinónimo de tecnología, utilizado en los sectores más vanguardistas, de hecho es difícil no encontrar diseños en los que la fibra de carbono sea un protagonista principal. Esto se debe fundamentalmente a sus características frente a los materiales clásicos. A continuación se detallan algunas ventajas e inconvenientes frente a otros tipos de materiales

Las principales ventajas que aportan los materiales compuestos como el CFRP son [8],

- Altas características mecánicas específicas.
- Diseño a medida.
- Alta resistencia química.
- Buen comportamiento frente al fuego.
- Reducción del número de componentes/elementos de unión.
- Buen comportamiento a fatiga.
- No existen problemas de corrosión.
- Gran estabilidad dimensional.
- Ahorro en peso.

Los principales inconvenientes de este tipo de materiales son,

- Costosos programas de evaluación, calificación y certificación de estructuras.
- Realización de costosas inversiones en instalaciones y equipos.
- Coste de los materiales elevado.
- Entrada de agua en estructuras sándwich.
- Baja resistencia a impacto.
- Protecciones adicionales frente a la erosión.
- Protecciones adicionales frente al rayo. Baja conductividad eléctrica.
- Díficil reciclado.

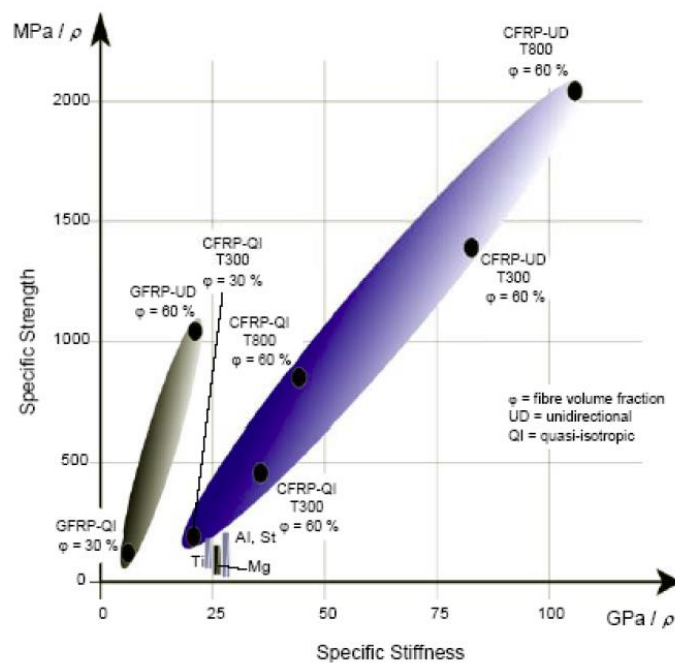


Figura 7. Comparación de características mecánicas de materiales compuestos y metales

2.3.2 Estado del arte de CFRP

La mayor parte de la demanda de fibra de carbono se centra en la actualidad en tres sectores, dos tradicionales desde su irrupción en el mercado (aeronáutico y artículos deportivos) y un tercero que podríamos denominar de “aplicaciones industriales”, muy amplio, que es el que está marcando la expansión a gran escala en el uso de este tipo de refuerzo.

La figura 8 [4] muestra la evolución de la demanda en el consumo de fibra de carbono de los últimos años y la previsión para el 2020. El repunte de las aplicaciones aeronáuticas junto con la expansión a gran escala en las aplicaciones industriales están siendo las responsables de un mercado en auge.

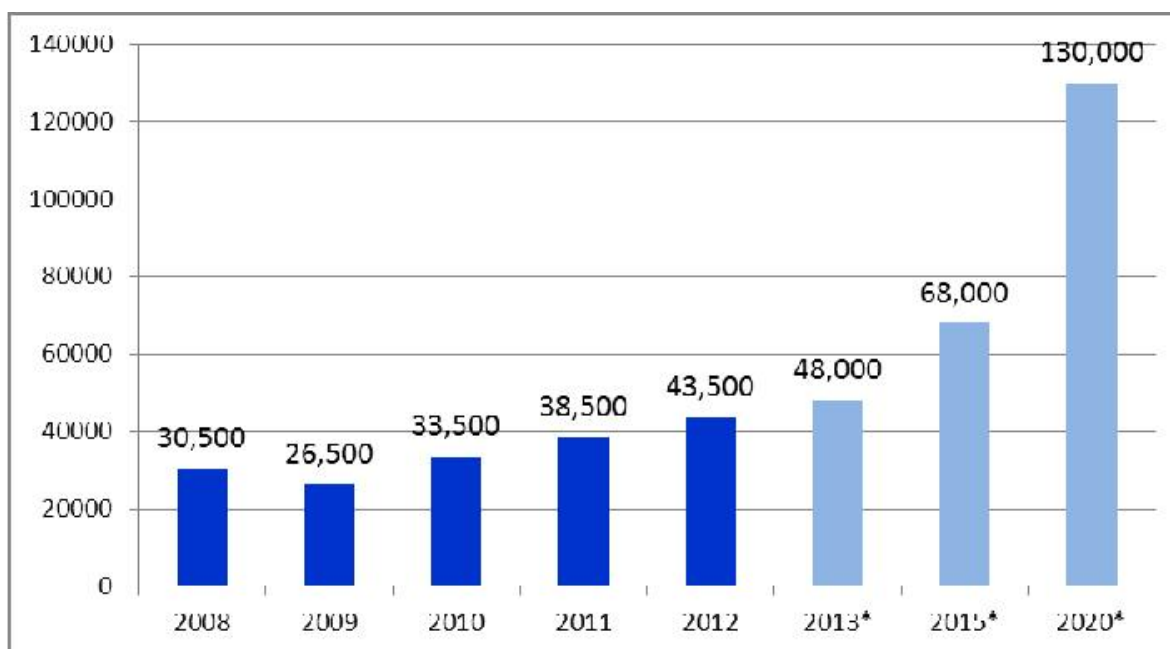


Figura 8. Demanda mundial de fibra de carbono en toneladas 2008-2020

2.4 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (también conocido como FEM por sus siglas en inglés), es un método de cálculo que se basa en dividir un cuerpo o estructura en pequeños elementos discretos, los cuales están unidos entre sí con diferentes condiciones de vínculo, lo que aporta una serie de ecuaciones que permiten resolver el estado de tensiones y deformaciones del sistema. Este método también es utilizado en matemáticas para resolver ecuaciones diferenciales de forma numérica.

Aplicando una serie de condiciones de contorno (en la estructura estas condiciones serían: restricciones y cargas aplicadas externamente) sobre el conjunto de elementos, nos permite resolver sistemas que no son fáciles de calcular mediante modelos matemáticos simples.

2.4.1 Concepto de FEM

El método de los elementos finitos, consiste en la representación de un cuerpo en un gran número de divisiones llamadas elementos. Cada uno de estos elementos se une entre sí mediante puntos llamados nodos.

Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirlo en un sistema de pequeñas porciones, tal que la suma de cada pequeña porción sea equivalente al cuerpo original. Una vez dividido, se obtiene una solución para cada división, que combinadas da como resultado la solución total. La solución del problema consiste en resolver los desplazamientos en cada nodo y a partir de ellos, las deformaciones y tensiones del sistema analizado. Las propiedades de cada nodo vienen dadas por las características del material utilizado en el estudio, que definen la rigidez del mismo, y la geometría del modelo. Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. Trabajando en régimen elástico, las ecuaciones que definen el sistema pueden expresarse de forma matricial como se muestra a continuación [5]:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}$$

Donde:

- $[K]$: es la matriz rigidez del sistema
- $\{\delta\}$: es el vector desplazamientos
- $\{F\}$: es el vector de esfuerzos

Los tipos de elementos utilizados generalmente en la resolución a través de FEM son:

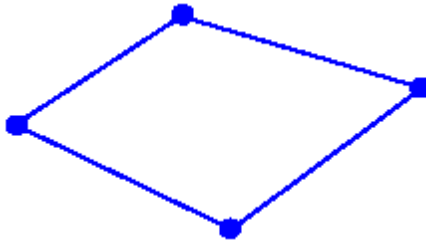
- **Elementos Lineales (1-D)**



Estos pueden ser:

- Resorte
- Barras
- Vigas
- Caños

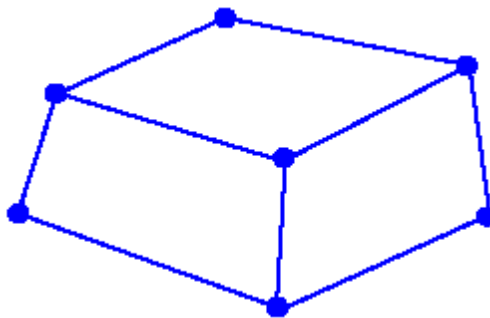
- **Elementos Planos (2-D)**



Estos pueden ser:

- Membranas
- Placas

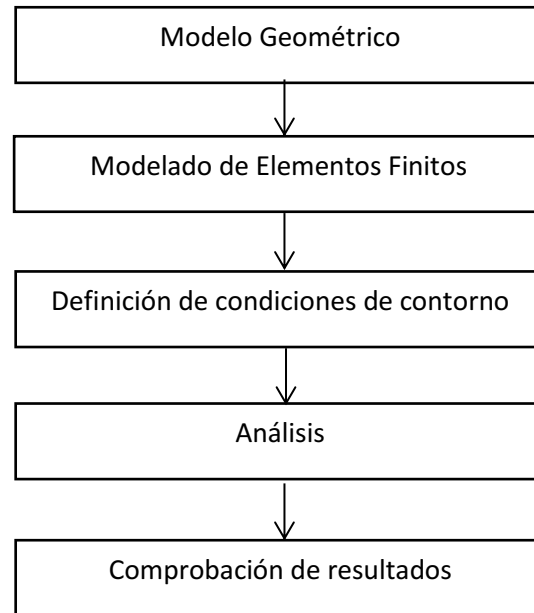
- **Elementos Sólidos (3-D)**



Es importante destacar que se puede utilizar combinaciones de estos elementos actuando en conjunto.

2.4.2 Proceso de Análisis por Elementos Finitos

Un esquema de análisis por elementos finitos podría ser:



- **Modelado Geométrico.** Creación del modelo matemático del objeto o del conjunto, reproducción del sólido o superficie a estudio de una forma precisa.
- **Modelado de Elementos Finitos.** Dividir la geometría del modelo en elementos discretos (mallado) y asignar las propiedades del material y del elemento.
- **Definición de condiciones de contorno.** Aplicar cargas externas y restricciones para simular el ambiente de la operación.
- **Análisis.** Computar los resultados (tensiones, deformaciones, etc.) a partir de análisis estáticos, dinámicos o de transferencia de calor.
- **Comprobación de resultados.** Comparar los resultados con los criterios de diseño. Rediseñar la estructura y repetir el proceso si fuese necesario.

Cabe destacar que la utilización de este tipo de software no implica la obtención del resultado exacto y real. Es solo una aproximación y está en el criterio del usuario el saber discernir entre un resultado coherente y uno que no lo es; además de conocer los márgenes de error y las limitaciones del modelo y el método.

3 Modelado

A diferencia de otro tipo de desarrollos, en los que se dispone de un modelo 3D para una posterior fabricación, en este caso, nos encontramos en la necesidad de realizar un modelo en base a una estructura fabricada. Para ello se recopila toda la información referente a las características geométricas, uniones, localización de refuerzos, y del chasis a estudio, con el fin de realizar un modelo que se asemeje al fabricado.

Este capítulo define los pasos que se han tomado para la modelización de dichos elementos, así como una descripción de cada uno de ellos.

3.1 Handbike Prototipo

La estructura, íntegramente fabricada en fibra de carbono y con una configuración basada en las estructuras tipo Handbike para uso en montaña existentes en el mercado, se caracteriza por una línea en el diseño sobria, en la que su principal objetivo ha sido reducir el peso global del sistema.

Como se observa en la figura 9, el diseño está basado en superficies planas en las que predominan los contornos rectos. Estas características hacen que, para una estructura con la finalidad de prototipo, la fabricación sea sencilla, debido a la no necesidad de útiles de apilado complejos, y económica, ya que la fabricación de cada elemento llevaría asociado un coste mayor por la necesidad del útil, tiempo de fabricación, etc.



Figura 9. Handbike prototipo (*SILLA KILIMANJARO*)

En la figura 10, se identifican el global de los elementos que componen el sistema, estructura o chasis (parte de este estudio), dirección, sillín, apoya pecho y apoya piernas, ruedas, así como el sistema de frenos, transmisión y pedalier (accionado por las manos).

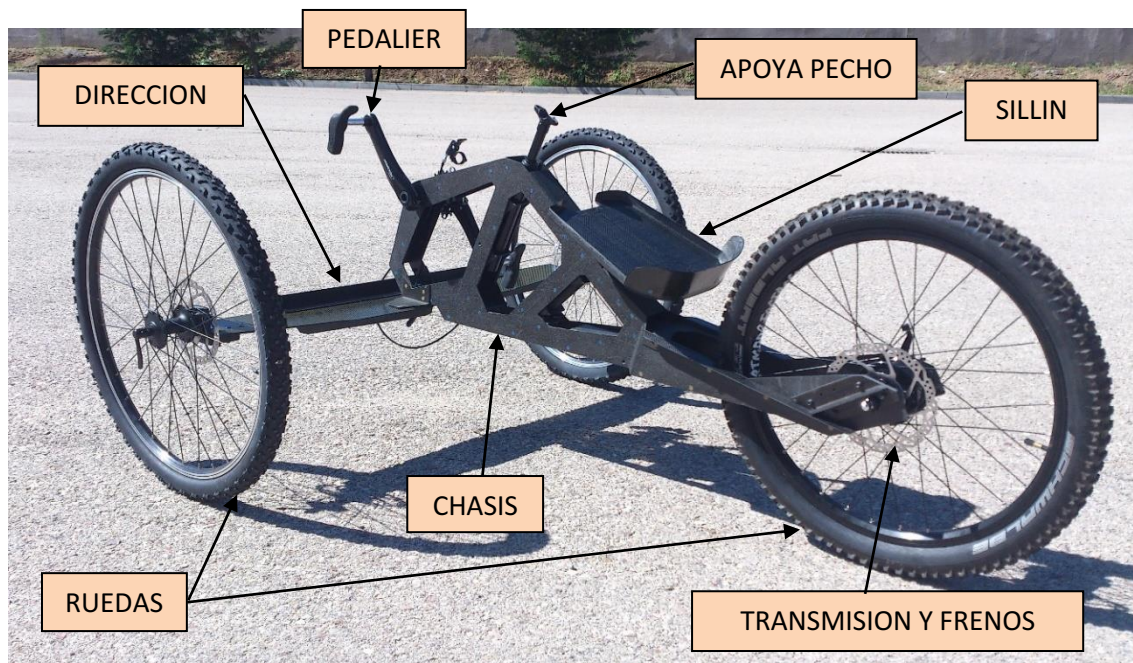


Figura 10. Handbike prototipo

Este estudio se basa en el análisis del chasis (figura 11), por lo que se realizará el modelo de los elementos que componen dicha estructura. Una vez elaborado el modelo 3D, se realizarán los planos de definición del conjunto y posteriormente un análisis estructural mediante el método de elementos finitos. Para ello se tendrá en cuenta la posición de cada elemento para la aplicación de cargas y restricciones externas que simulen el total del sistema.



Figura 11. Chasis, estructura a estudio

3.2 Modelado Chasis de Handbike

En el desarrollo del modelo 3D, el primer paso ha sido la obtención de las principales dimensiones que definen la estructura. Estas medidas se han tomado directamente sobre el prototipo in situ.

Con el uso de diferentes herramientas de medición técnicas (calibre, micrómetro, etc.) se obtienen las dimensiones necesarias para la definición geométrica. Con esta información, y mediante software CAD, se desarrollan los modelos 3D. Hablamos de ellos en plural porque cada elemento es diseñado independientemente para posteriormente realizar un ensamblado que da como solución el conjunto del chasis (figura 12).

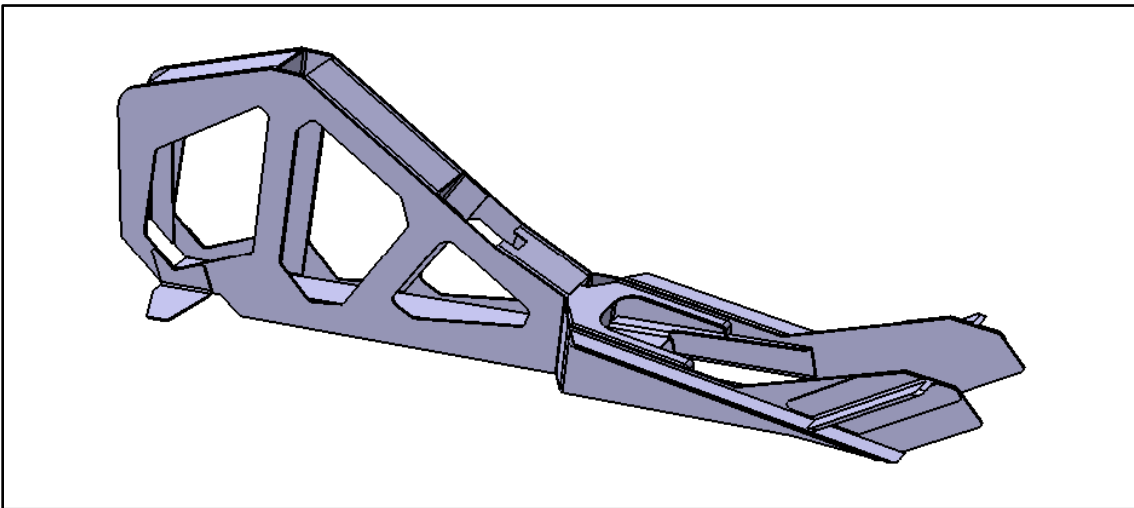


Figura 12. Chasis de Handbike

Estos modelos serán la base de la información recogida en los planos, de las superficies que se utilizarán para la realización del análisis estructural, así como de posibles evoluciones para futuros desarrollos.

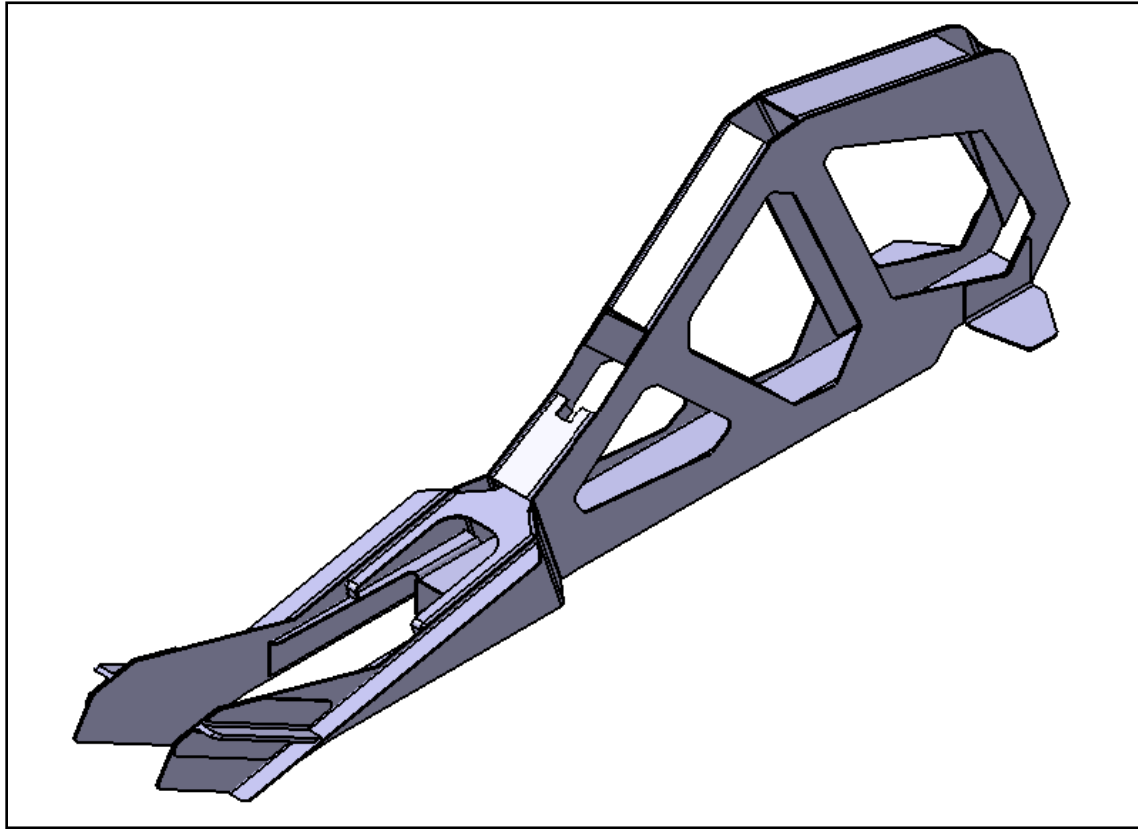


Figura 13. Chasis de Handbike modelo 3D

Gracias a la simulación CAD, podemos trabajar con modelos similares a la realidad y plantear alternativas al diseño sin la necesidad de fabricar piezas que posteriormente no sean necesarias. Esto nos ayuda también a obtener información sobre posibles problemáticas en el diseño, interferencias entre elementos, defectos de fabricación, estudios de mantenibilidad...

A continuación se muestran varias figuras en las que se pueden comparar los elementos fabricados con los modelos 3D. En ellas se observa cómo se asemejan los modelos realizados en software CAD a la realidad.



Figura 14. Cuerpo de chasis fabricado

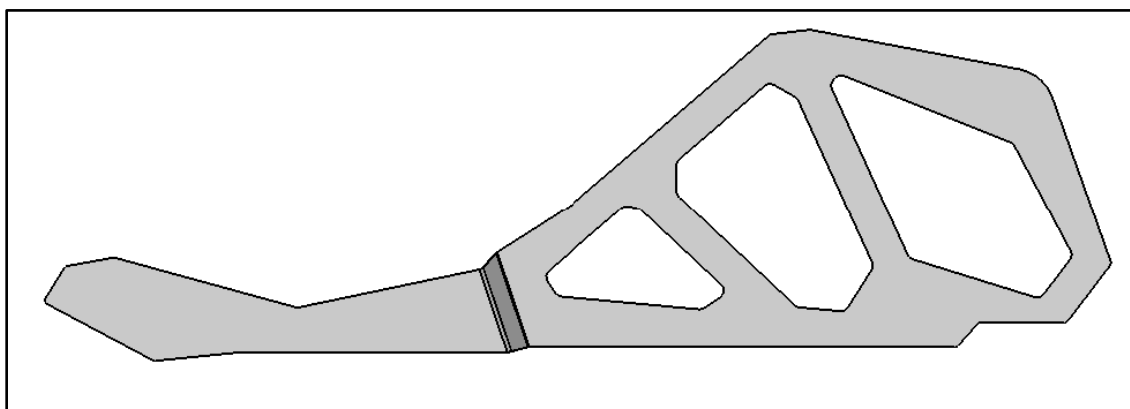


Figura 15. Cuerpo de chasis modelo 3D



Figura 16. Refuerzos interiores fabricados.

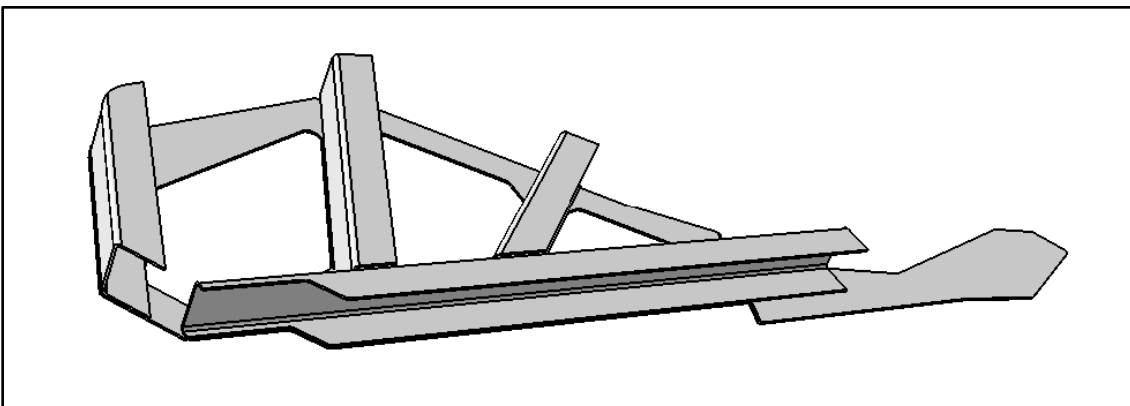


Figura 17. Refuerzos interiores modelo 3D

3.3 Descripción del conjunto

El chasis formado por 18 elementos (figura 18) se dispone de forma simétrica, lo que le hace ser estructuralmente estable, al no aparecer esfuerzos internos en la estructura por una disposición de masas no equilibrada. Desde el punto de vista del modelado, esta simetría, reduce la complejidad de la solución, ya que gracias a las herramientas CAD, solo es necesario definir un elemento y el simétrico se puede realizar de forma automática.

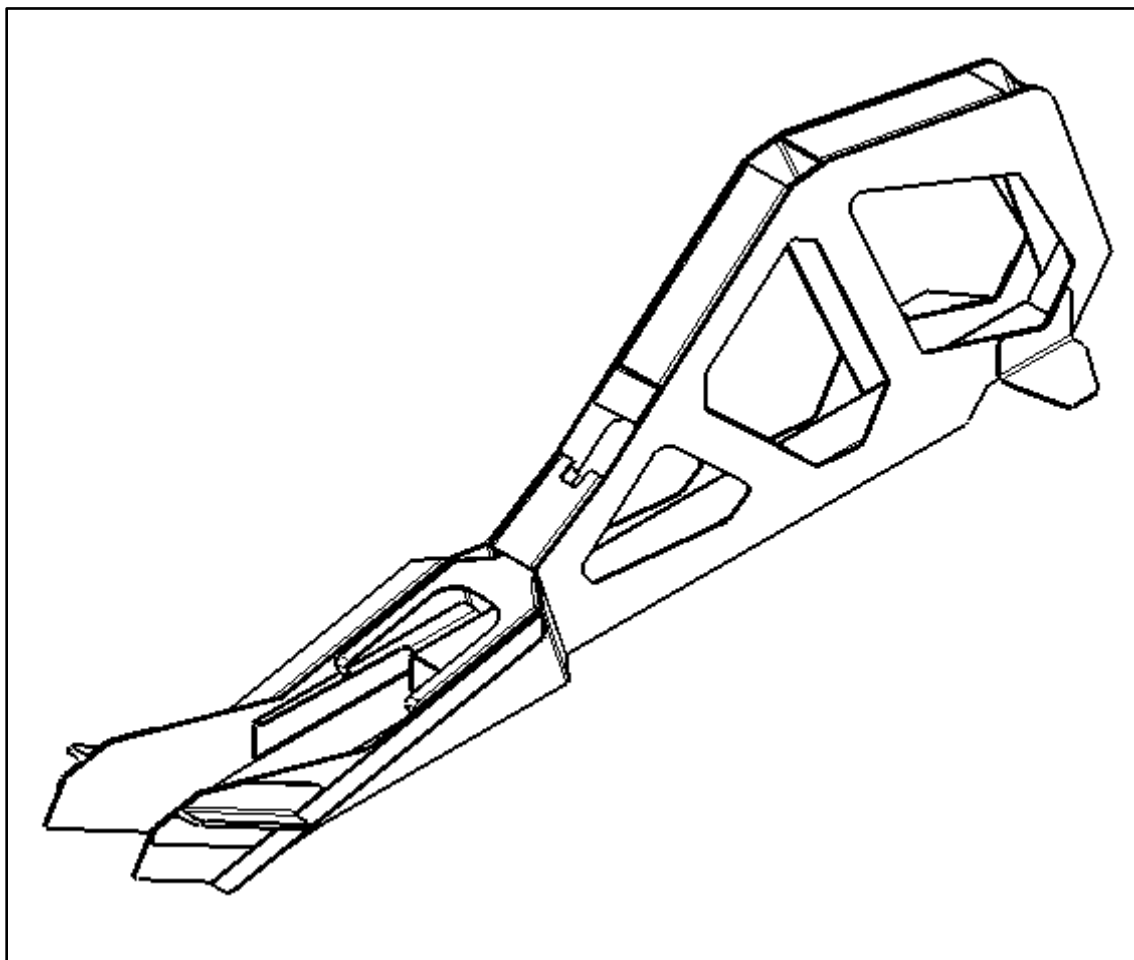


Figura 18. Chasis, vista isométrica

Para una descripción más detallada, a continuación se muestra una vista explosionada (figura 20) en la que se disponen todos los elementos del sistema. Cada uno de ellos ha sido indicado con un número de ítem; en la lista de materiales (tabla 2) se puede ver su designación.

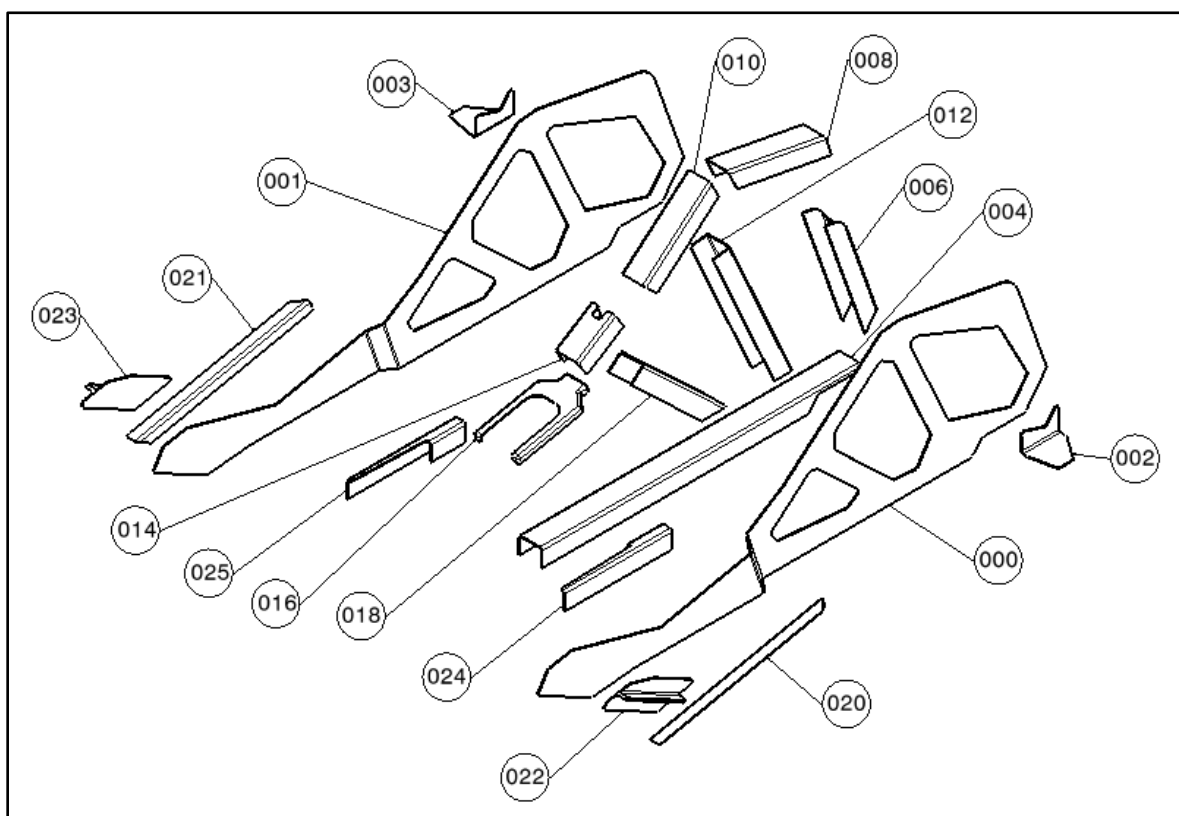


Figura 19. Conjunto de chasis explosionado

ITEM	DESCRIPTION	QTY
000	CUERPO CHASIS RH	1
001	CUERPO CHASIS LH	1
002	PERFIL "L" DIRECCION RH	1
003	PERFIL "L" DIRECCION LH	1
004	PERFIL "U" INFERIOR	1
006	PERFIL "U" FRONTAL	1
008	PERFIL "U" SUPERIOR DELANTERO	1
010	PERFIL "U" SUPERIOR MEDIO	1
012	PERFIL "U" MEDIO 1	1
014	PERFIL "U" SUPERIOR TRASERO	1
016	REFUERZO RUEDA TRASERA	1
018	PERFIL "U" MEDIO 2	1
020	PERFIL "L" TRASERO RH	1
021	PERFIL "L" TRASERO LH	1
022	PERFIL "T" TRASERO RH	1
023	PERFIL "T" TRASERO LH	1
024	PERFIL "U" RUEDA TRASERA RH	1
025	PERFIL "U" RUEDA TRASERA LH	1

Tabla 2. Lista de materiales

El conjunto se ha dividido en los siguientes tres grupos:

- Cuerpos del chasis (Figura 20): Elementos principales, que sirven de soporte del conjunto. Formado por dos piezas que dan la forma del chasis.
- Refuerzos internos (figura 21 y figura 22): En su mayoría refuerzos en forma de “U”, sirven para unir los cuerpos del chasis.
- Refuerzos externos (figura 23): Realizados con formas en “L” y “T”, se utilizan para aumentar la rigidez de la estructura en la zona de soporte de la rueda trasera y la dirección.

En la estructura existente, la unión entre elementos se ha realizado mediante un proceso de remachado. En el caso de la estructura simulada, se toma el método de copegado como unión, de manera que cada pieza será fabricada independientemente para un posterior ensamblaje mediante adhesivo, ya que es el tipo de unión que se desea realizar en futuras fabricaciones.

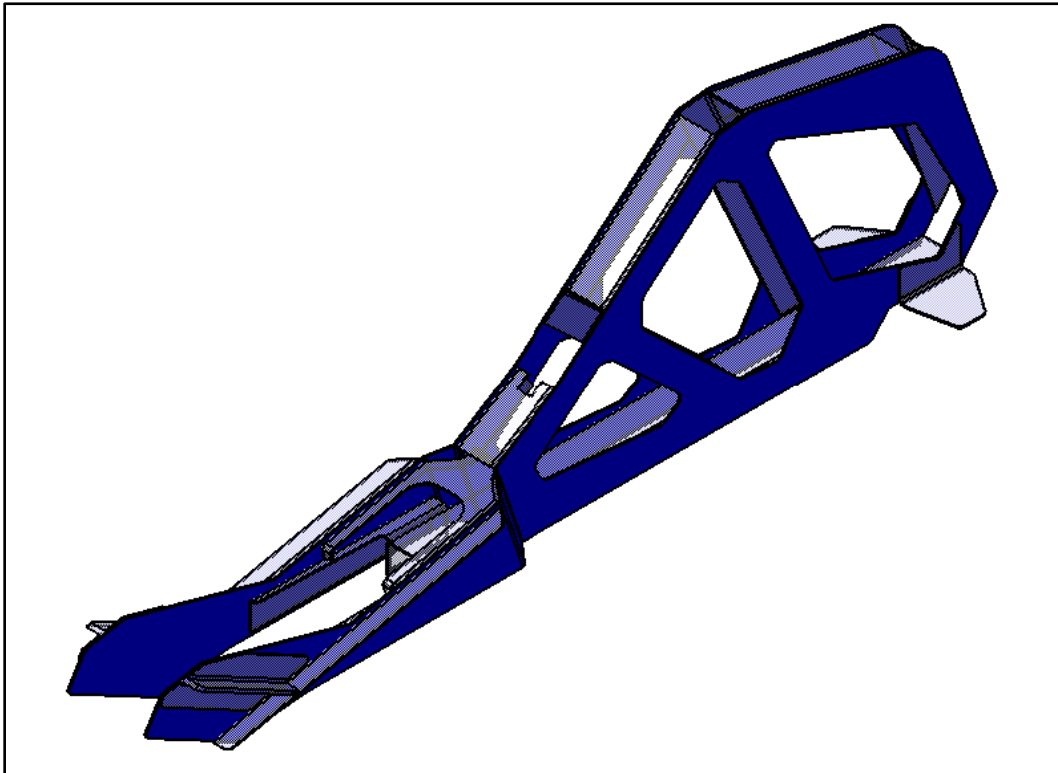


Figura 20. Cuerpos del chasis RH y LH.

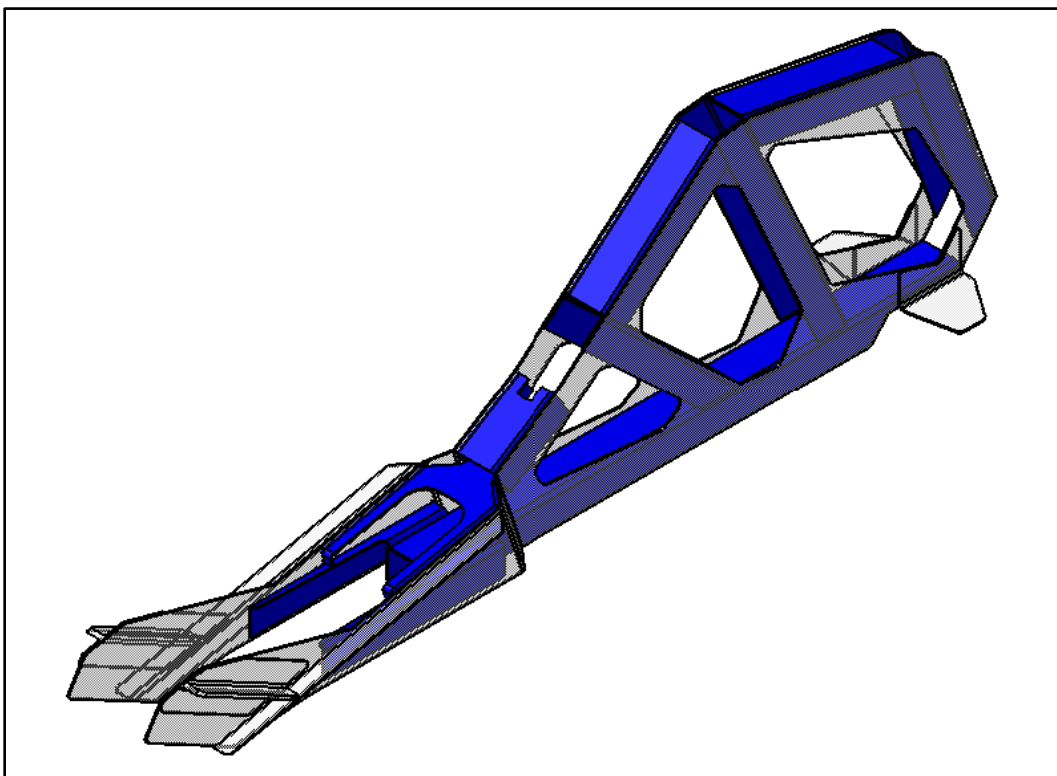


Figura 21. Refuerzos internos

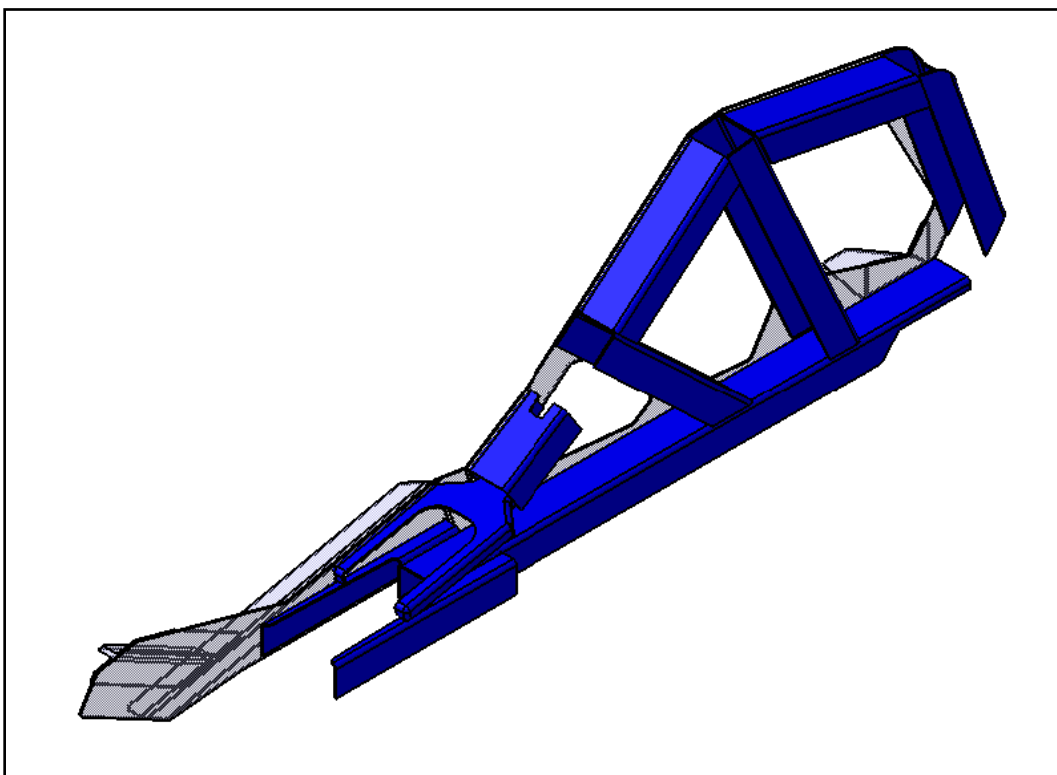


Figura 22. Refuerzos internos ("CUERPO CHASIS RH" no mostrado)

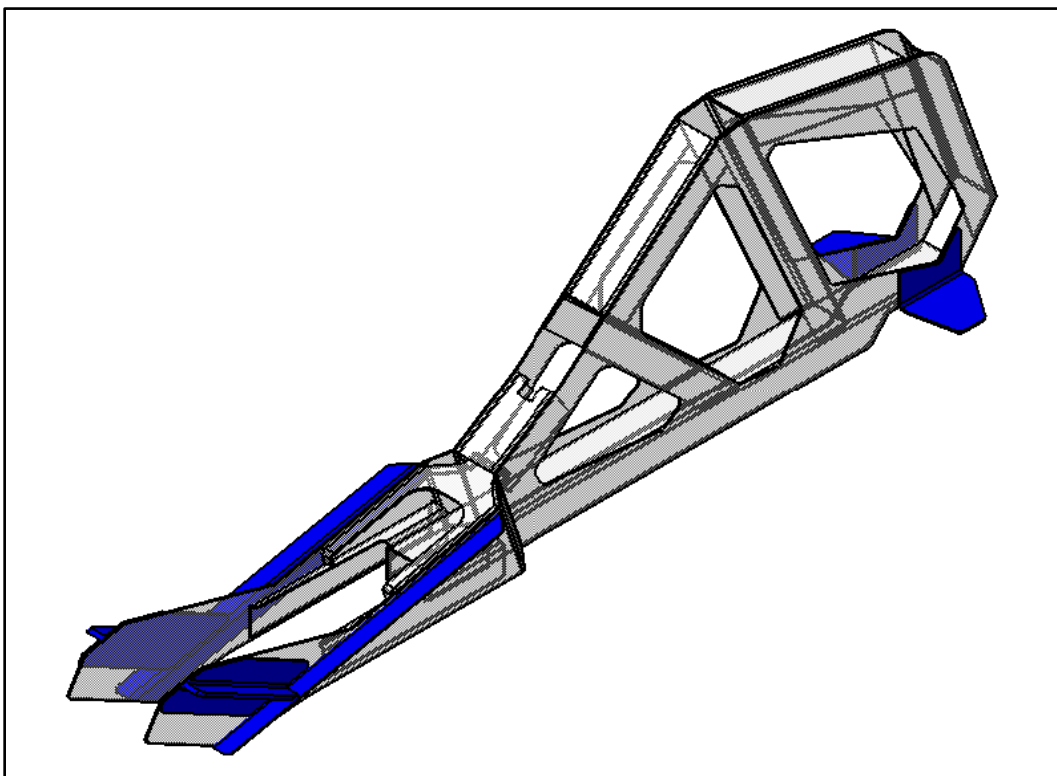


Figura 23. Refuerzos externos

3.4 Descripción por elemento

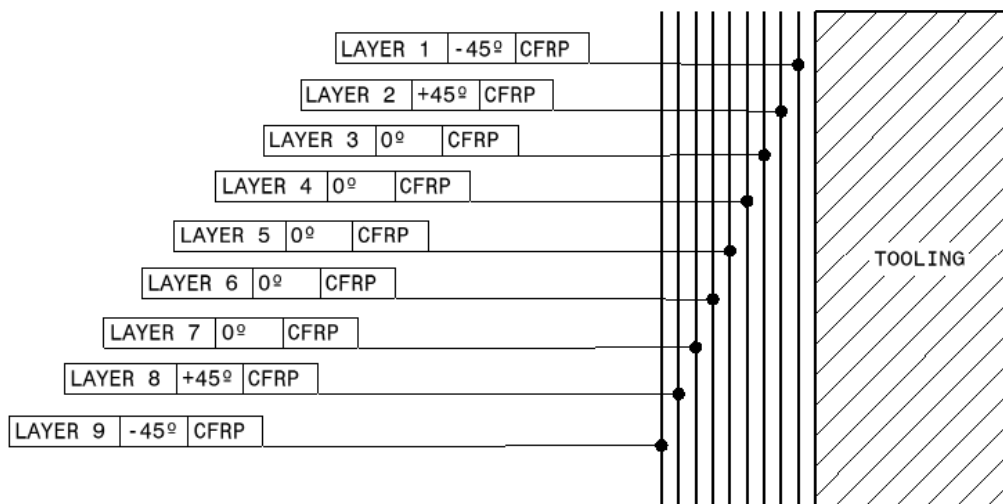
Para la fabricación de cada elemento se ha homogeneizado la solución de fabricación, tomando algunas características estándar para todas las piezas.

- **Material:** fibra de carbono bidireccional PREPEG.

Espesor de tela (mm)	0,25	
Densidad ρ (g/cm³)	1,53	
	Dir 1	Dir 2
E Tens (MPa)	60300	60300
σ Tens (Mpa)	605	605
ϵ	10×10^{-3}	10×10^{-3}
	Dir 1	Dir 2
E Comp (Mpa)	60300	60300
σ Comp	451	451
ϵ	$-7,5 \times 10^{-3}$	$-7,5 \times 10^{-3}$

Tabla 3. Propiedades de la fibra de carbono curada

- **Lay-up / apilado:** en todos los casos una secuencia similar de apilado, 9 telas con direcciones (-45°/45°/0°/0°/0°/0°/45°/-45°), en las que la dirección 0° será en la dirección longitudinal de la pieza.



- **Espesor de pieza:** 2,2mm, según espesor y número de tela.

3.4.1 Cuerpos del chasis

Piezas principales del conjunto, simétricas entre sí, dan forma al sistema y sirven de apoyo al resto de elementos. Son las piezas base de todo el conjunto.

Cada pieza es fabricada de una vez y de forma plana. Se caracterizan por tener dos planos distintos de apoyo, dejando mayor distancia entre ellas, en la parte trasera para la inserción de la rueda. Los vaciados en la zona media del cuerpo tienen una función estética, puesto que permiten darle forma a lo que sería una pieza sobria, y también de aligeramiento, ya que se elimina una gran cantidad de material disminuyendo el peso de estos elementos.

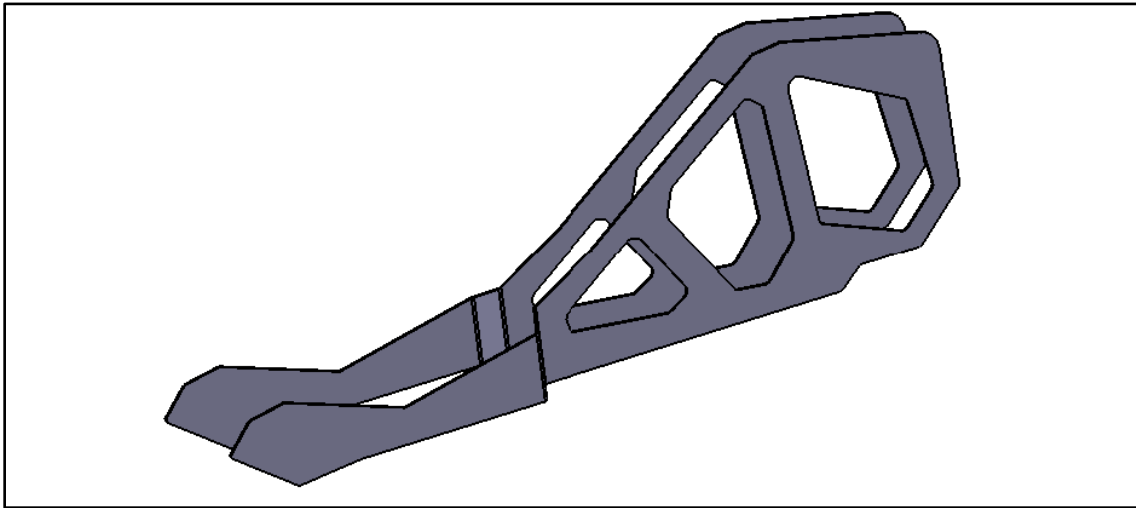


Figura 24. Cuerpos del chasis RH y LH

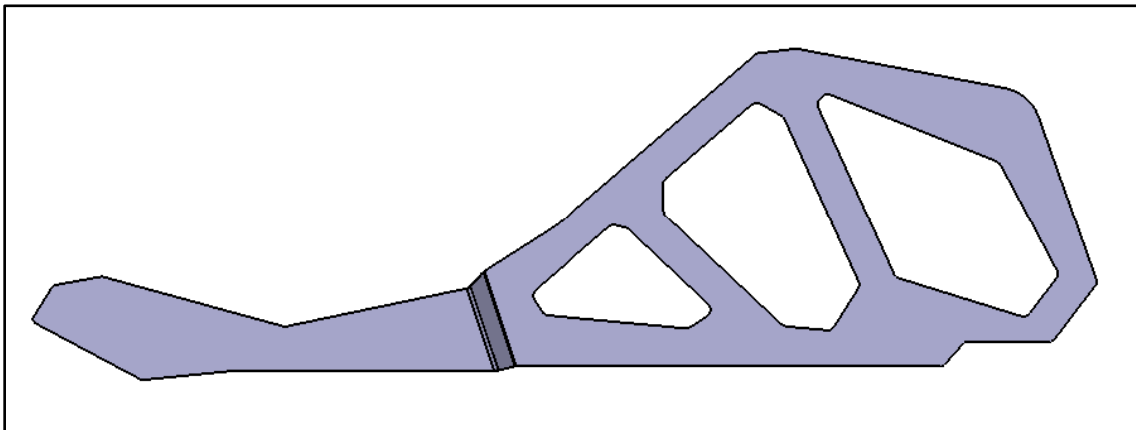


Figura 25. Cuerpo del chasis RH

3.4.2 Refuerzos internos

Elementos que sirven de unión de los dos cuerpos del chasis. En su mayoría diseñados en forma de “U”, aportan estabilidad y rigidez al sistema. Estos elementos se unen al cuerpo del chasis mediante el proceso de copegado, de forma que cada elemento se fabrica independientemente mediante un proceso de curado estándar para un posterior ensamblaje.

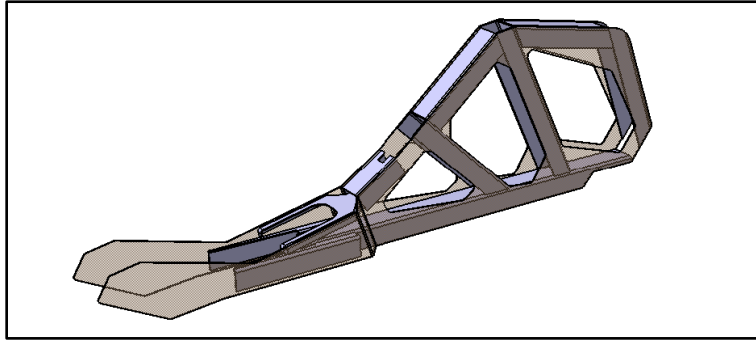


Figura 26. Refuerzos internos, vista isométrica

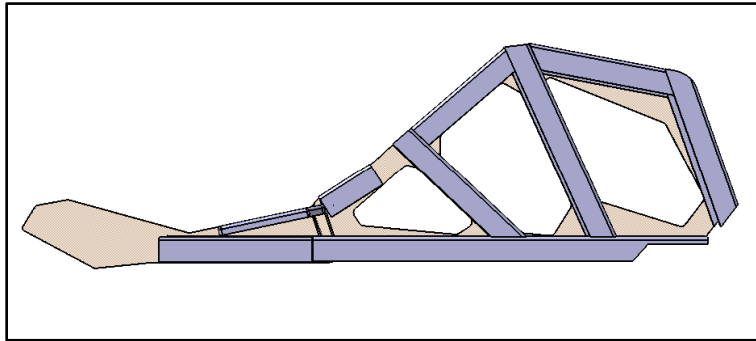


Figura 27. Refuerzos internos, vista lateral

En este tipo de piezas se utiliza un útil de tipo macho, que permite un apilado según el esquema siguiente.

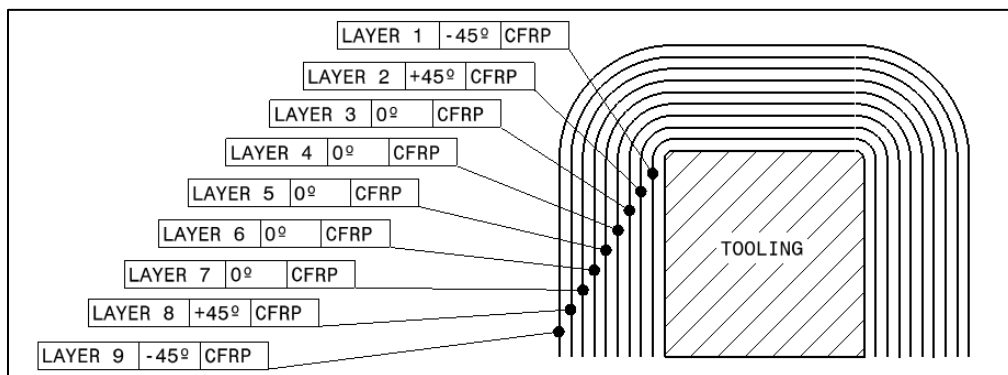


Figura 28. Esquema estándar de apilado en refuerzos internos

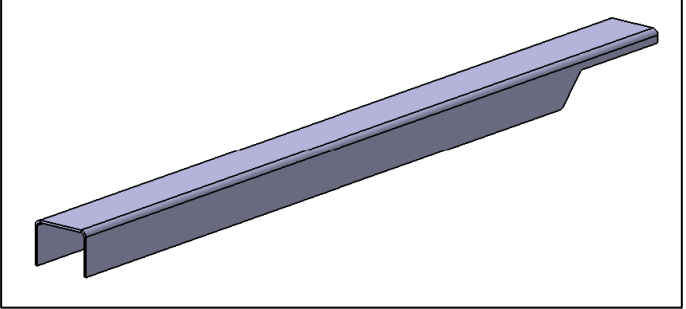
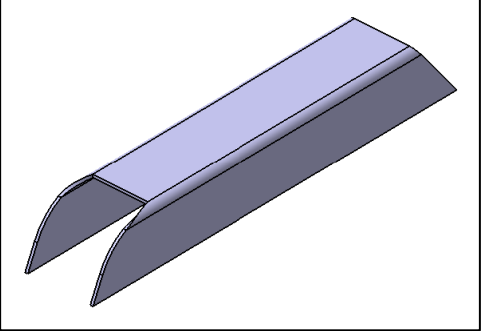
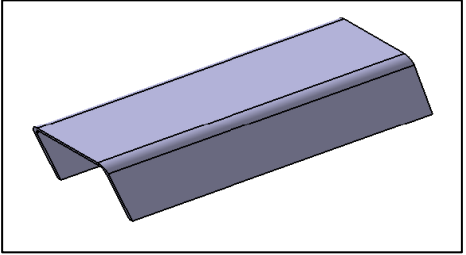
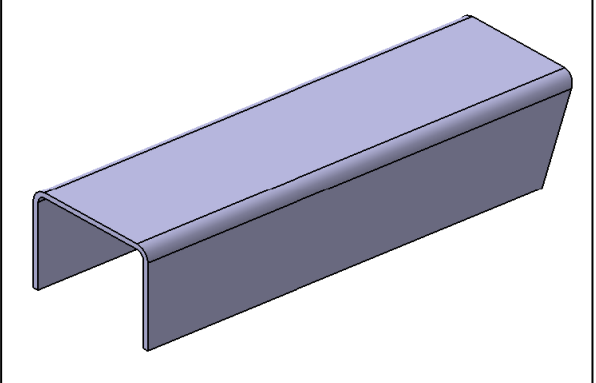
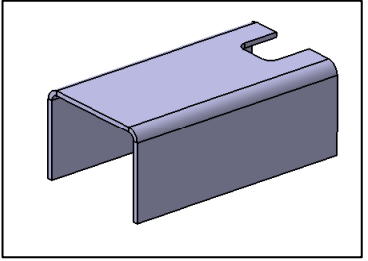
<p>PERFIL "U" INFERIOR</p>	
<p>PERFIL "U" FRONTAL</p>	
<p>PERFIL "U" SUPERIOR DELANTERO</p>	
<p>PERFIL "U" SUPERIOR MEDIO</p>	
<p>PERFIL "U" SUPERIOR TRASERO</p>	

Figura 29. Detalle refuerzos internos 1

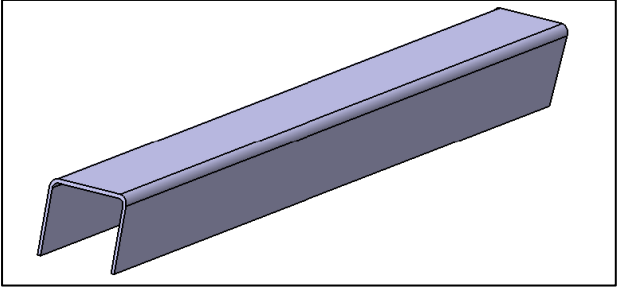
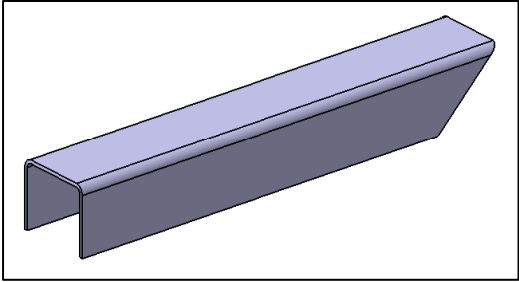
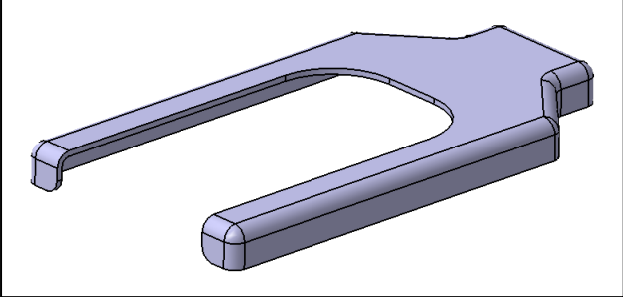
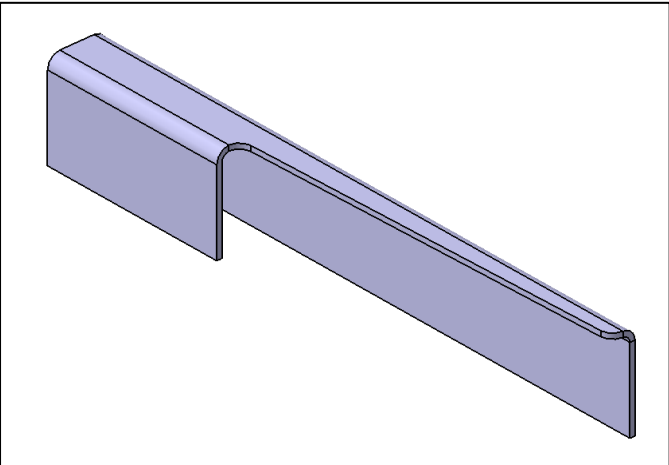
<p>PERFIL “U” MEDIO 1</p>	
<p>PERFIL “U” MEDIO 2</p>	
<p>REFUERZO RUEDA TRASERA</p>	
<p>PERFIL “U” RUEDA TRASERA RH/LH</p>	

Figura 30. Detalle refuerzos internos 2

3.4.3 Refuerzo externos

Existen tres tipos de refuerzos externos, todos dispuestos de forma simétrica. En la parte delantera se instalan dos angulares con perfil en “L” (figura 31), estos se utilizan como apoyo sobre la dirección. En la parte trasera se disponen dos refuerzos, un perfil en “L” que se dispone a lo largo de la zona posterior de la estructura, y un perfil en “T”, que sirve de refuerzo en el punto de fijación de la rueda trasera.

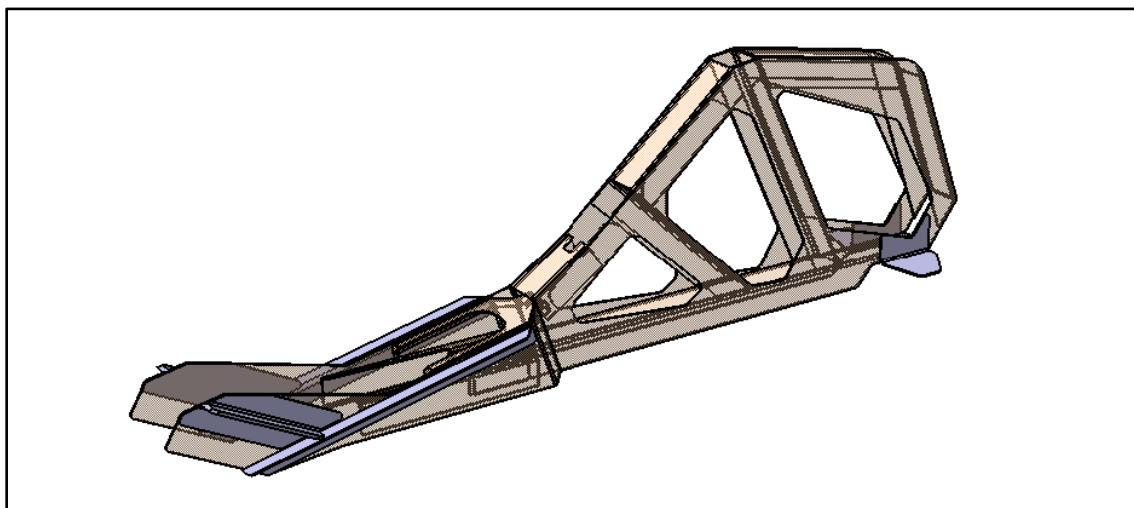


Figura 31. Refuerzos externos, vista isométrica

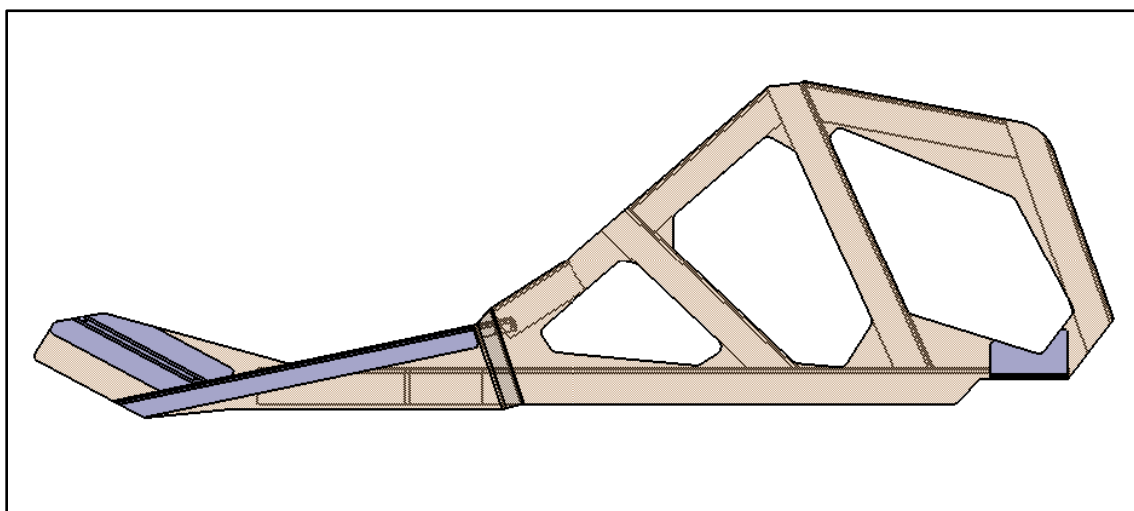


Figura 32. Refuerzos externos, vista lateral

A continuación se muestran el esquema de apilado para las piezas con perfil en “L” (figura 33) y perfil en “T” (figura 34).

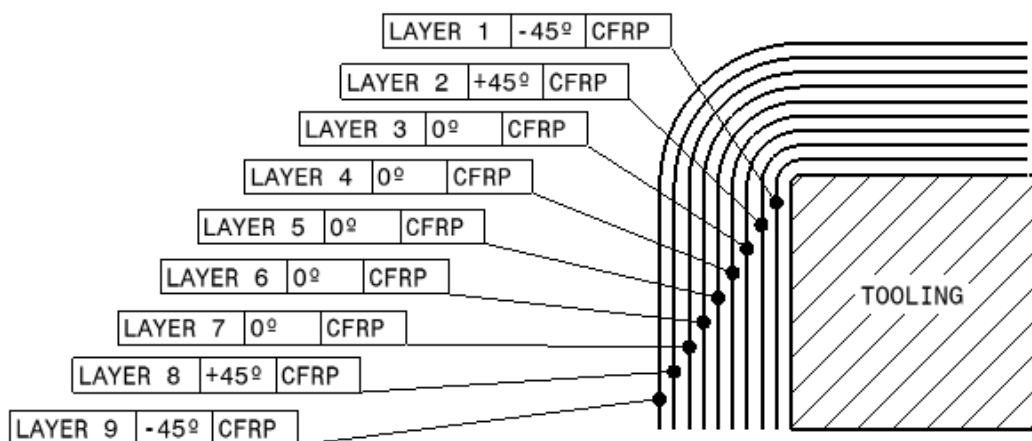


Figura 33. Esquema de apilado en refuerzos internos perfil en “L”

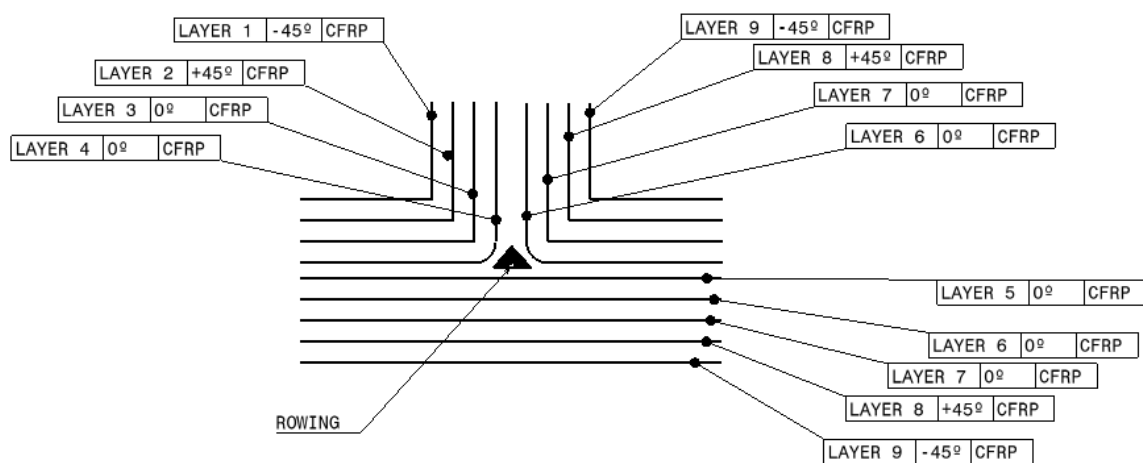


Figura 34. Esquema de apilado en refuerzos internos perfil en “T”

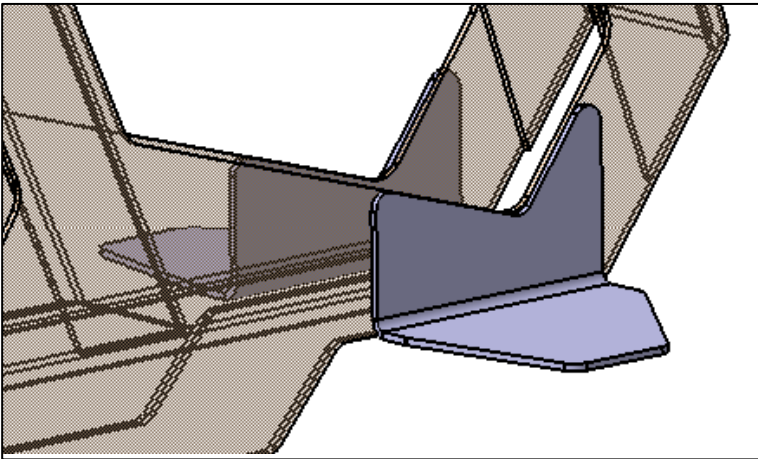
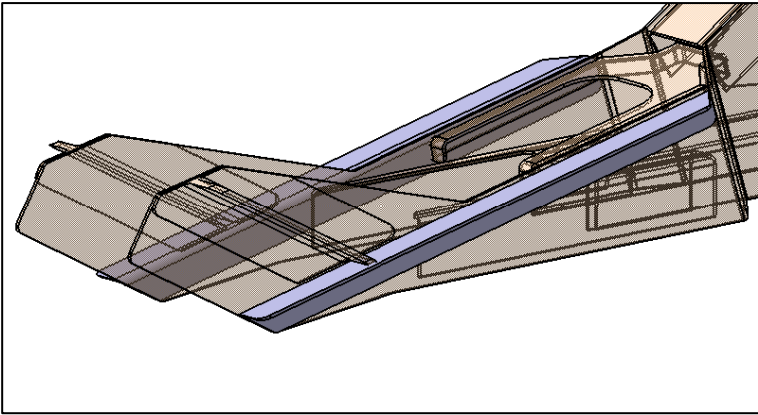
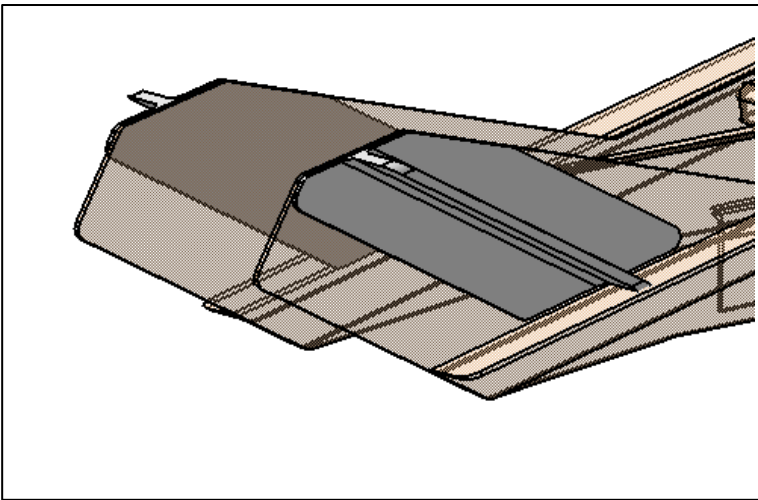
<p>PERFIL "L" DIRECCION RH / LH</p>	
<p>PERFIL "L" TRASERO RH / LH</p>	
<p>PERFIL "T" TRASERO RH / LH</p>	

Tabla 4. Detalle refuerzos exteriores

4 Análisis estructural

Dentro de los objetivos de este proyecto, el análisis estructural permite obtener una solución numérica de una estructura ante determinadas cargas externas. En este apartado se realiza un modelo FEM, basado en las superficies de la estructura modelada con anterioridad, y se somete a unas condiciones de contorno que simulan las situaciones de uso.

4.1 Definición modelo FEM

La realización del análisis FEM seguirá el siguiente esquema:

- **Modelado Geométrico.** Creación de un modelo basado en las superficies obtenidas en el modelo CAD como superficies de referencia.
- **Modelado de Elementos Finitos.** Se realizará el mallado de cada superficie y se dividirá cada superficie en pequeñas divisiones (elementos) unidas entre sí por puntos llamados nodos.
- **Definición de condiciones de contorno.** Se aplican cargas externas y restricciones para simular las condiciones de uso de la estructura.

4.1.1 Modelado Geométrico,

El modelo geométrico que se utilizará para el cálculo FEM está basado en las superficies de apoyo de cada una de las piezas que componen el sistema. Gracias a la compatibilidad entre ambos software, se emplearán las superficies de los modelos CAD y se exportarán al software FEM mediante el formato .IGS, que permite el uso en ambos entornos. Un modelo basado en superficies permite en los casos en los que se utiliza material compuesto, realizar una simulación aplicando propiedades al material como son los espesores de las telas utilizadas y la orientación de estas.

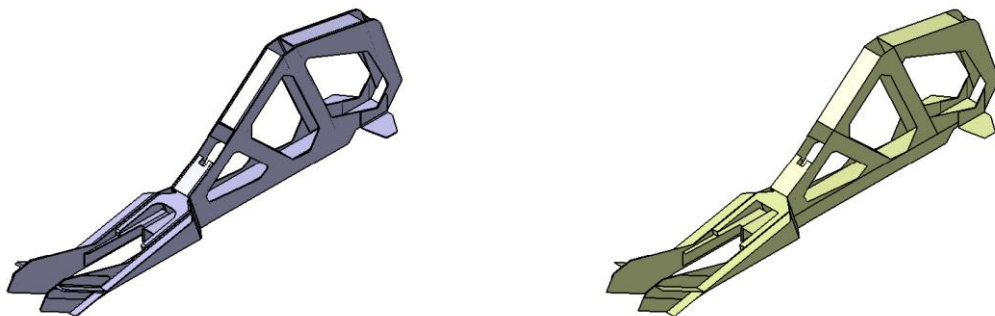


Figura 35. Comparación modelo 3D del chasis y superficies para calculo FEM

A la hora de realizar el modelo FEM, no se tendrán en cuenta algunos detalles que se han considerado en el modelo CAD, como pueden ser redondeos en mecanizados o redondeos en faldillas, ya que este tipo de geometrías dificultan el procesado en el software y pueden llevar a la obtención de resultados erróneos en estas áreas, en la figura 36 y tabla 5, podemos observar algunos de estos detalles.

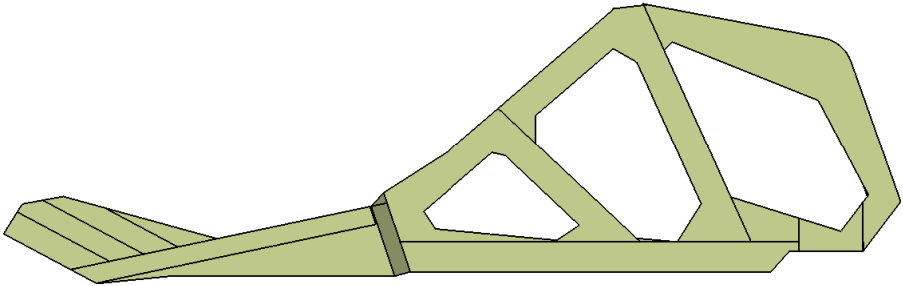


Figura 36. Superficies modelo FEM

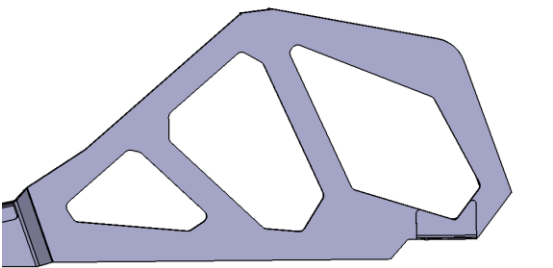
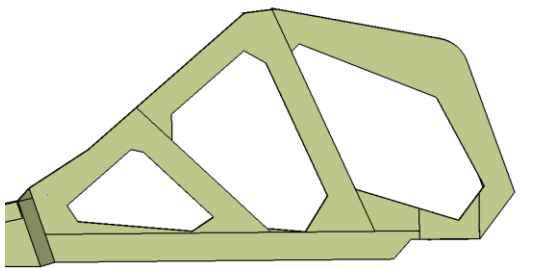
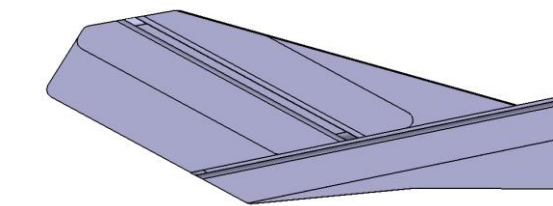
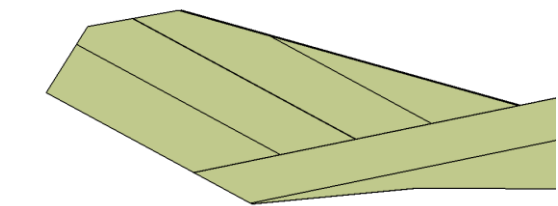
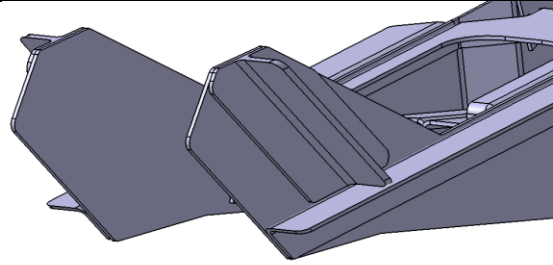
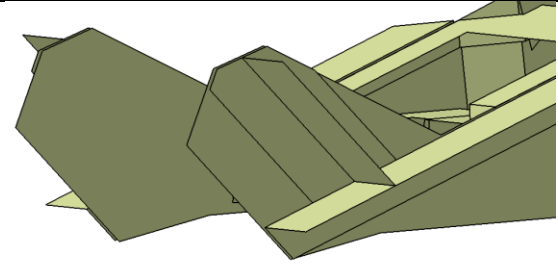
Modelo CAD	Modelo FEM
	
	
	

Tabla 5. Comparación modelos CAD Modelos FEM

4.1.2 Modelado de Elementos Finitos

Utilizando las superficies del modelo geométrico como soporte, se realiza el mallado del conjunto. El mallado consiste en dividir cada superficie en pequeños elementos, cuyas características no son estándar, y son necesarias de definir según las características del problema que se esté analizando. Para realizar una malla de homogénea, lo que otorga mayor sensibilidad a la malla y permite obtener mayor exactitud en los resultados, las superficies se dividen previamente a realizar la operación de mallado, lo que facilita la obtención de forma automática de elementos homogéneos (figura 37).

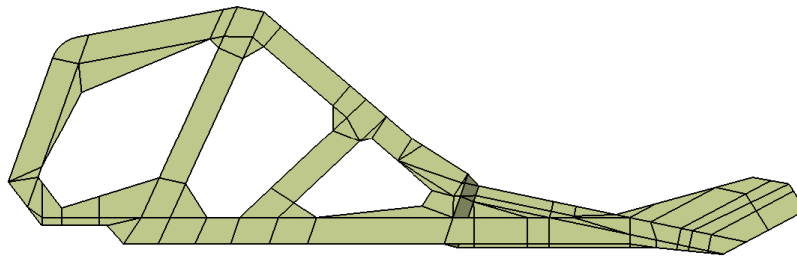


Figura 37. División de superficies en modelo geométrico

Las características principales del mallado (figura 38) son:

- Tipo de elemento Quad4.
- Nº de elementos 51969.
- Tamaño de elemento 5mm, el mallado se realiza dividiendo las curvas que delimitan cada superficie, con una distancia entre nodos de 5mm.
- Durante la realización del modelo se efectuaron una serie de comprobaciones que permiten analizar la calidad del modelo, bordes libre (cada pieza es mallada independientemente, esta opción comprueba que todas las mallas están unidas), normals (dirección de apilado), calidad de elementos (verifica el tipo y la forma de cada elemento), conectividad (unión de todos los elementos).

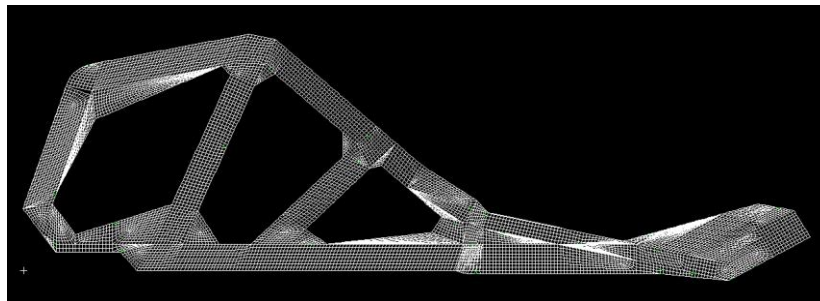


Figura 38. Vista general del mallado

4.1.3 Definición de condiciones de contorno

Debido a la finalidad que tiene la estructura, cuya característica principal es una velocidad de avance lenta, se plantea un análisis estático, en el que se aplican condiciones de empotramiento en las superficies de apoyo sobre la dirección y los puntos de fijación de las ruedas traseras. Las fuerzas que se aplicaran a la estructura serán, una la producida por el peso del usuario, y otra, la ejercida sobre el pedalier.

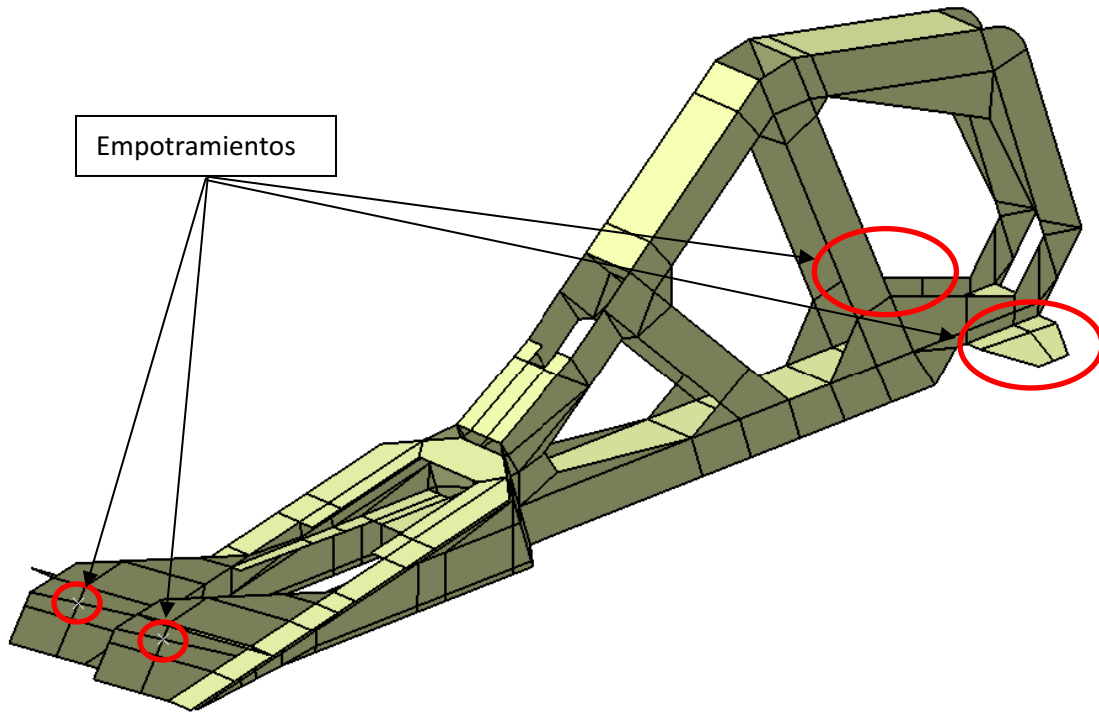


Figura 39. Puntos de empotramiento

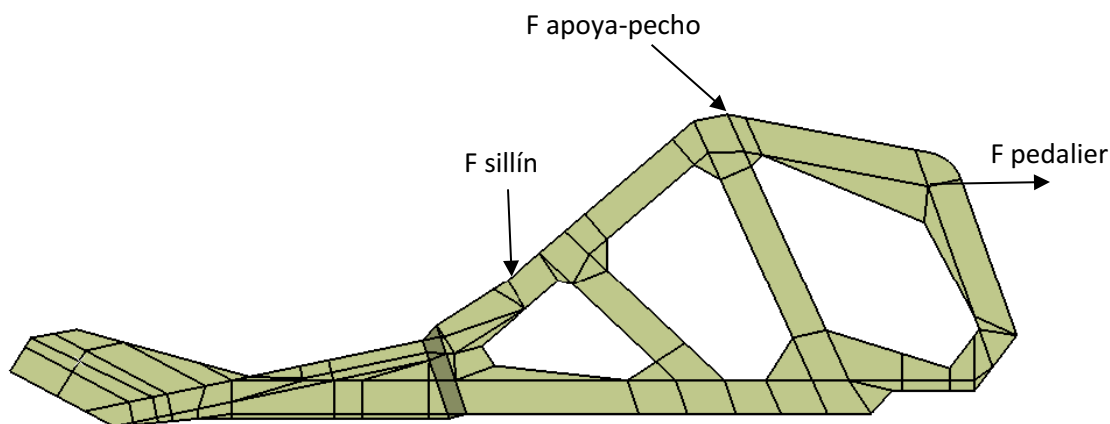


Figura 40. Zonas de aplicación de cargas

Como situación normal, el peso del usuario se reparte entre el sillín y el apoya-pecho, para el análisis se plantean dos hipótesis de situaciones límites:

- Todo el peso sobre el sillín, la fuerza que se ejerce sobre la estructura se localiza en el punto de fijación del sillín a la estructura.
- Todo el peso sobre el apoya-pecho, toda la fuerza que se ejerce sobre la estructura se localiza en el punto de fijación del apoya pecho a la estructura.

Se tomara un valor de 1000N, que simula el peso del usuario, y una carga 600N efectuada sobre el pedalier, esta carga se estima en función de estudios sobre bielas de bicicletas realizados en la UC3M [9], y teniendo en cuenta que la fuerza ejercida será mediante los brazos en vez de las piernas

- $F_{sillin} = 1000N$
- $F_{apoya-pecho} = 1000N$
- $F_{pedalier} = 600N$

4.2 Resultados

En base a las características descritas en los apartados anteriores, se realiza un análisis de tipo estático (SOL101), cuyos resultados aportan información de desplazamientos máximos, y puntos de concentración de microstrains (micro deformaciones).

Los materiales compuestos no son homogéneos, son anisótropos y quebradizos. Esto determina los diferentes modos de falla del material, algunos relacionados con la falla de los constituyentes y otros relacionados con la falla de la interface [10].

Pueden ser considerados dos modos de falla diferentes [10]:

- Relacionado con una carga a tracción.
- Relacionado con una carga a compresión.

Una característica de la fibra es que no suele mostrar deformación plástica, estando su falla relacionada con un fenómeno de redistribución de esfuerzos a las fibras vecinas. Esta redistribución puede causar una nueva ruptura de la fibra. En el caso de una carga a compresión, el micro pandeo progresivo de las fibras tiene lugar hasta que las fibras se rompen [10].

Uno de los criterios más utilizados para este tipo de materiales es el criterio de Tsai-Hill, basado en los criterios de falla [10].

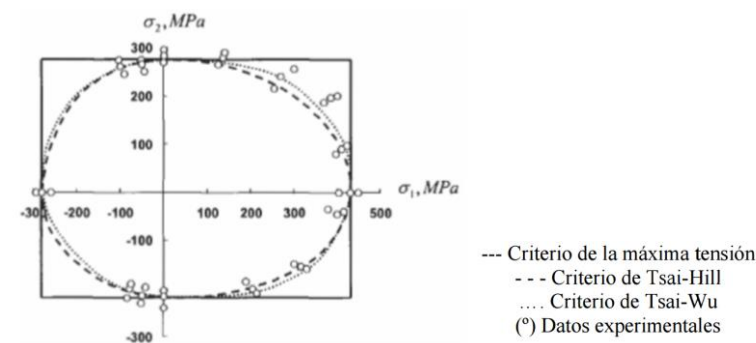


Figura 41. Envoltente de falla para un composite en el plano (σ_1 σ_2)

En este estudio se toma para el criterio de fallo los valores de máxima concentración de microstrains admisibles obtenidos en ensayos, estos datos se basan en probetas realizadas en un material similar al descrito.

Valores máximos admisibles de microstrain $\pm 3000 \mu\epsilon$.

Valores máximos admisibles de máxima deformación 10% de la longitud característica, se tomara como longitud característica la que corresponde a la dirección de la deformación.

4.2.1 Análisis estático carga en sillín y pedalier

- **Desplazamientos.** Valor máximo 29.8mm

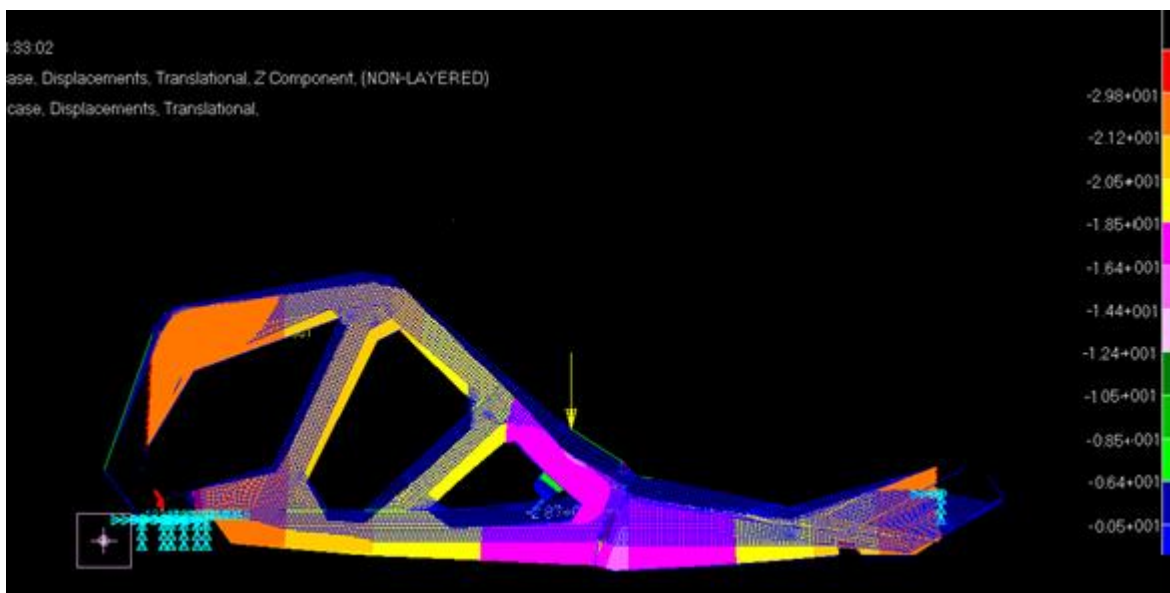


Figura 42. Desplazamientos, hipótesis de carga en el sillín y pedalier

- **MicroStrains.** Valor máximo 1090 $\mu\epsilon$

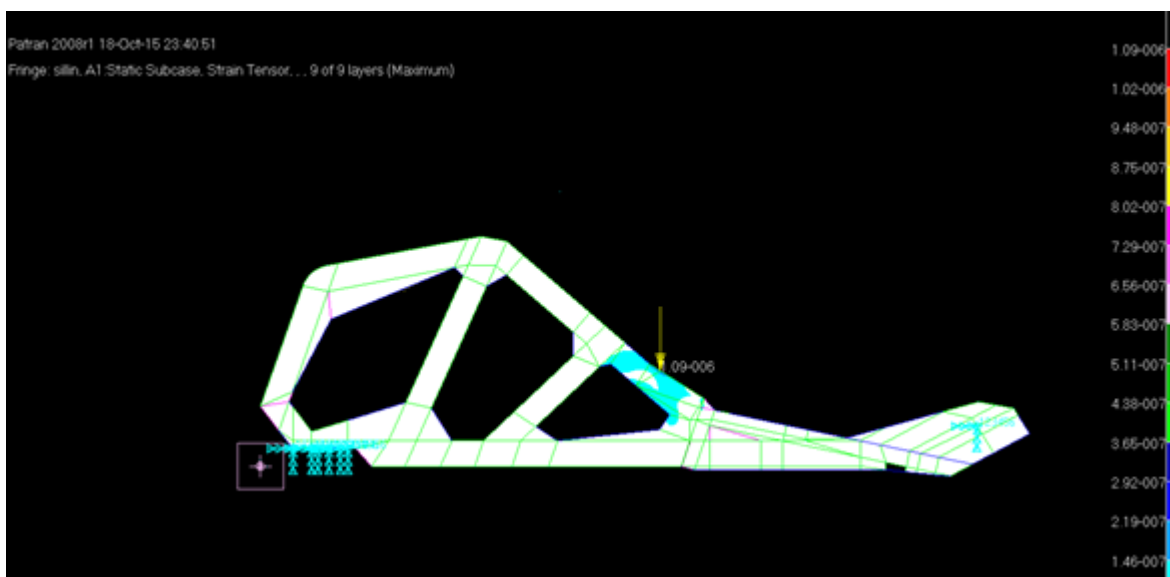


Figura 43. Micro Strains, hipótesis de carga en el sillín y pedalier

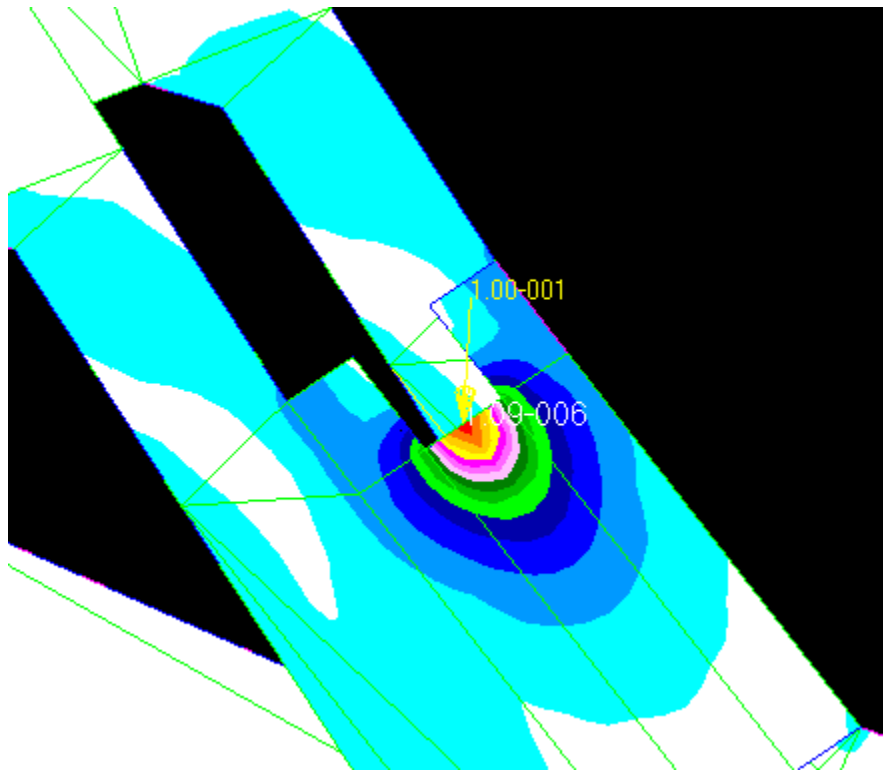


Figura 44. Detalle zona concentración de microstrain

4.2.2 Análisis estático, carga en apoya-pecho y pedalier

- **Desplazamientos.** Valor máximo 40mm

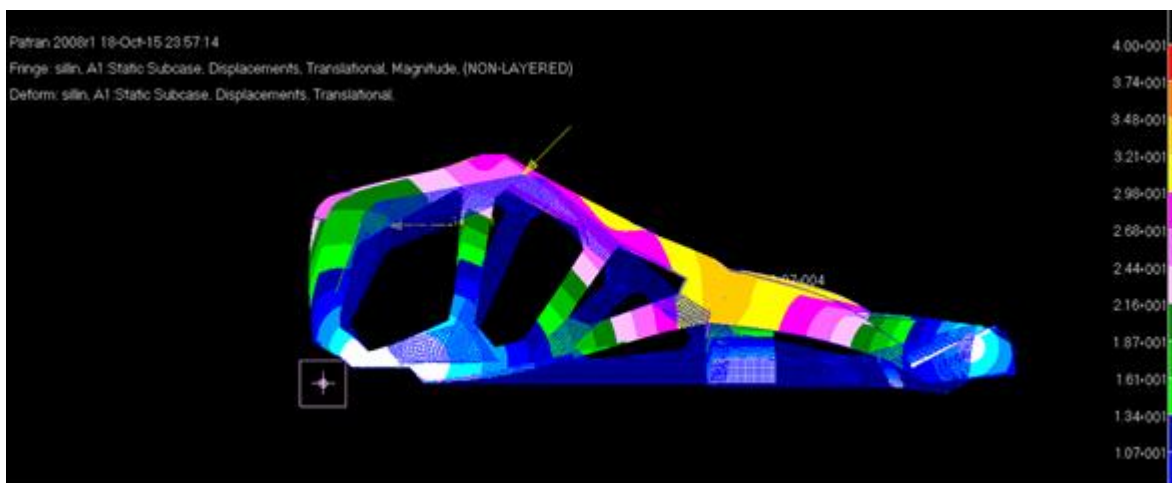


Figura 45. Desplazamientos, hipótesis de carga en el apoya-pecho y pedalier

- **MicroStrains.** Valor máximo 2240 $\mu\epsilon$

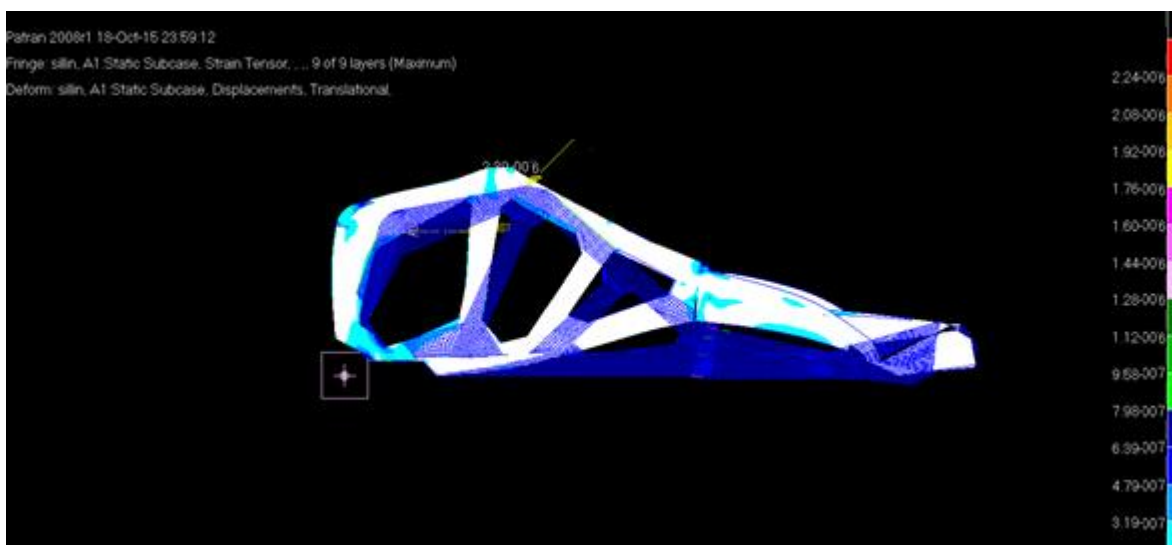


Figura 46. Micro Strains, hipótesis de carga en el apoya-pecho y pedalier

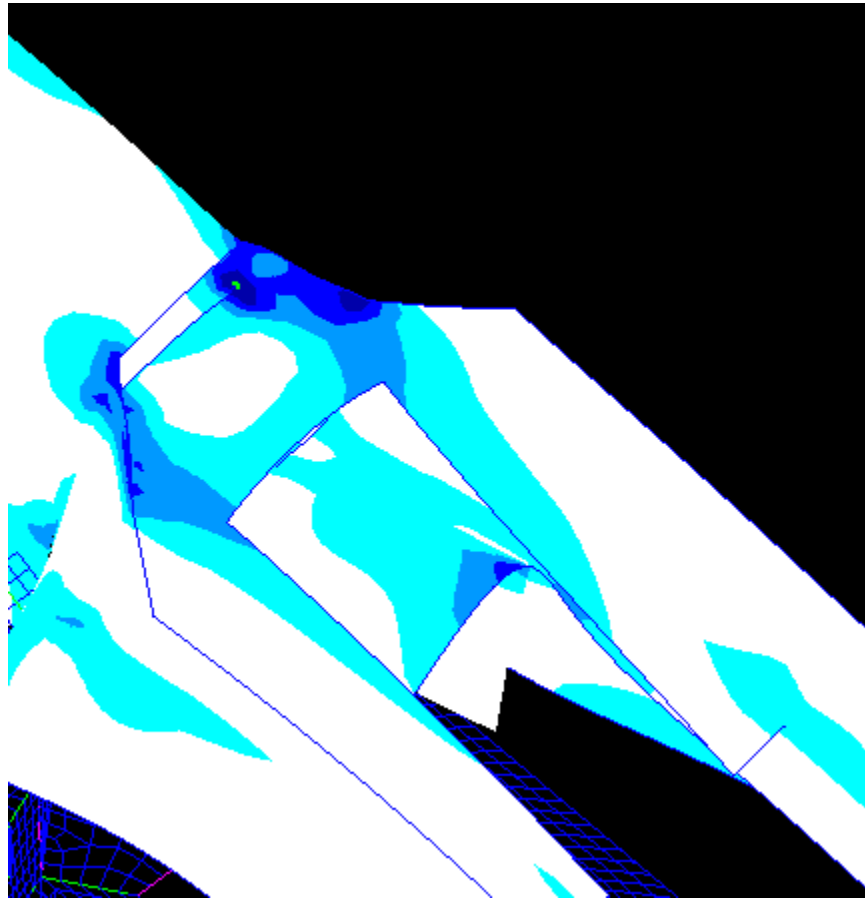


Figura 47. Detalle zona concentración de microstrain

5 Conclusiones

5.1 Diseño

Realizar un modelo 3D en función de una estructura ya fabricada, ayuda a entender el potencial que tienen las herramientas CAD y las distintas opciones que le permiten al diseñador en el desarrollo de un producto. Disponer de un modelo 3D permite realizar una gran cantidad de análisis y pruebas, que sin él sería necesario realizar in situ sobre la estructura dificultando el proceso de desarrollo, ya que cualquier implementación llevaría asociado un coste por la necesidad de fabricación y una dedicación de tiempo mayor.

De las opciones que permite el modelo 3D cabe destacar:

- Realizar análisis geométrico aportando referencias y dimensiones características (distancia entre ejes, dimensiones libres de interferencias, espesores, distancias a borde...)
- Incorporación de nuevos elementos, permite realizar estudios de la inserción de nuevos refuerzos sin la necesidad de fabricación, y estudiar qué tipo de impacto tienen sobre la estructura
- Optimización y personalización del modelo, permitiendo desarrollar nuevas configuraciones que aporten mejoras (reducción de peso, modificando espesores, redimensionado de refuerzos...) sin la necesidad de realizar la fabricación de cada estudio.
- La realización y modificación de planos, con el software CAD, es realmente útil, ya que permite obtener información relevante a la fabricación de forma rápida y con un alto grado de definición, y una modificación en la documentación se puede realizar en un corto espacio de tiempo.
- Parametrización de los modelos, de cara a posibles modificaciones futuras, el software CAD permite parametrizar las principales dimensiones 3D, permitiendo la implementación de cambios en estas dimensiones con un alto ahorro de tiempo en el proceso.

5.2 Análisis estructural

Durante la realización del modelo FEM, se realizan numerosos pasos de comprobación del modelo, como se describen en el apartado 4.1.2, otra forma de comprobar que el modelo planteado es correcto (un mallado continuo sin bordes libres) es analizar la resultante deformada de la estructura. En ambos casos, la resultante que obtenemos es previsible en función de la localización de las cargas, y corroboran la continuidad entre los elementos.

Los desplazamientos máximos obtenidos entran dentro de un rango admisible de deformación, siendo para ambos casos menores al 10%. Tomando como longitud característica 400mm (dimensión de la estructura en el eje Z) en el caso de las cargas aplicadas en el sillín, obtenemos una deformación de un 7,5%. En el caso de la carga aplicada sobre el apoya-pecho, se toma una longitud característica de 1200mm (dimensión de la estructura en el eje X), se obtiene una deformación del 3,5%.

La concentración de microstrain en ambas situaciones de carga, son inferiores a los rangos máximos admisibles de $\pm 3000\mu\epsilon$, obteniendo como resultado una estructura que soporta este tipo de sollicitaciones. Destacar en este apartado, que la localización de máximas tensiones se concentra en el área del refuerzo trasero (figura 47).

6 Trabajo futuros

Un proyecto de estas características posibilita una gran cantidad de estudios y análisis en su desarrollo, que serían de gran utilidad para una optimización de la solución propuesta. A continuación se plantean algunos de ellos como línea de futuros desarrollos:

- Análisis estructural estático y dinámico, teniendo como base los modelos 3D desarrollados en este proyecto.
- Diseño y análisis de la dirección de la handbike, realización de los modelos 3D necesarios así como un análisis estructural de estos.
- Estudio para la incorporación de un sistema de amortiguación en la zona de la dirección y su impacto sobre la estructura, tipo de amortiguación, puntos de fijación...
- Estudio ergonómico, analizando diferentes configuraciones en función de la minusvalía y las características del usuario, sexo, tamaño, peso, así como las necesidades de cambio en la estructura para poder adaptarla.
- Comportamiento de la estructura en situaciones de descenso, planteando hipótesis en la que la velocidad de avance sea alta y se produzcan grandes desaceleraciones y cambios de dirección bruscos.
- Estudio geométrico para la incorporación de accesorios típicamente utilizados en el ciclismo, como son el bidón de agua, kit de herramientas, iluminación.

7 Referencias

- [1] Revista ONE Junio 2015.
- [2] <http://www.tanzaniaparks.com/kili.htm>
- [3] <http://elkilimanjaro.com>
- [4] <http://www.cep-plasticos.com>
- [5] Introducción a la Teoría de Elementos Finitos, 2008, Ing. Santiago Pezzotti, Ing. Federico Antico, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata.
- [6] <http://handbike.blogspot.com.es/2012/01/handbike-terenowy-explorer-fs.html>
- [7] Apuntes asignatura de Materiales Estructurales para la Industria del Transporte (Master Materiales Estructurales Nuevas Tecnologías de UC3M).
- [8] Apuntes del departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] Estudio mediante elementos finitos de los esfuerzos producidos en una biela de bicicleta. Trabajo Fin de grado. Francisco Javier Gesé Bordils.
- [10] Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos, Matías Molinier. Serie de monografías en Mecánica de Laminados Compuestos. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.